

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra Aplikované mechaniky

Návrh hnacího hřídele závodního automobilu

Design of Racing Car Drive Shaft

Student:

Bc. Václav Prejda

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Martin Fusek, Ph.D.

Ostrava 2020

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra aplikované mechaniky

Zadání diplomové práce

Student:

Bc. Václav Prejda

Studijní program:

N2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

3901T003 Aplikovaná mechanika

Téma:

Návrh hnacího hřídele závodního automobilu
Design of Racing Car Drive Shaft

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod do problematiky
2. Konstrukce hnacích hřídelů a jejich návrh
3. Vytvoření výpočetního modelu pro návrh hnacího hřídele
4. Pevnostní kontrola stávajícího hnacího hřídele a návrh nového
5. Validace dosažených výsledků výpočetními simulacemi

Seznam doporučené odborné literatury:

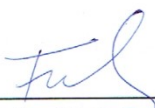
- [1] Chassis Design: Principles and Analysis, William F. & Douglas L. Milliken, Complement to Race Car Vehicle Dynamics published in February 2002. Based on previously unpublished technical notes by Maurice Olley. ~700 pages
- [2] Race Car Vehicle Dynamics, William F. & Douglas L. Milliken, Approximately 900 pages devoted to understanding and explaining vehicle dynamics. Over 30000 copies sold since 1995.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

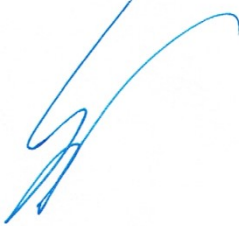
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Martin Fusek, Ph.D.**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020


doc. Ing. Martin Fusek, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 18.5.2020


.....


Podpis autora práce

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou diplomovou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této diplomové práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu v oprávněném užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18.5.2020


.....
Podpis autora práce

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Martinu Fuskovi, Ph.D., jehož odborné rady a připomínky pro mě byly inspirací a důležitou součástí diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Lukáši Wawrzyczkovi, Ing. Danielu Antošovi a Ing. Radku Holubovi za cenné rady a možnost využití výpočetní techniky firmy Continental. Rád bych poděkoval také své přítelkyni a rodině, kteří mi byli v období celého studia důležitou oporou. Děkuji také studentům, kteří se podíleli na vývoji studentské formule Vector 06, za zpětnou vazbu při návrhu nového hřídele. Rovněž děkuji také všem zaměstnancům Katedry Aplikované mechaniky za příkladný přístup ke studentům a možnosti nabýt potřebných znalostí.

Anotace diplomové práce

Prejda,V. *Návrh hnacího hřídele závodního automobilu – diplomová práce*. OSTRAVA: VŠB - Technická Univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra Aplikované mechaniky. Vedoucí práce: Fusek, M.

Diplomová práce je zaměřena na návrh nového hnacího hřídele, který bude použit pro studentskou formuli Vector 06. Jako první byla provedena kontrola současného hnacího hřídel, který je použit na formuli v současnosti. Hřídel byl zkontrolován analytickým i konečnoprvkovým výpočtem, kdy byly analyzovány různé části hřídele. Návrh nového hřídele byl proveden s nutností splnění již dříve stanovených podmínek. Byly použity moderní materiály, které začínají mít velký význam v automobilovém průmyslu. Výpočty diplomové práce byly provedeny v softwaru Ansys Workbench 2019R3, ve kterém byly použity nástavby ACP Preprocesor a ACP Postprocesor.

Klíčová slova

hřídel, Vector 06, kompozit, klouby, studentská formule

Anotation of thesis

Prejda, V. *Design of Racing Car Drive Shaft*. OSTRAVA: VSB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Applied Mechanics. Thesis, head: Fusek, M.

The diploma thesis is focused on the design of a new drive shaft, which will be used for the student formula Vector 06. The first was to check the current drive shaft, which is used on the formula. The shaft was checked by analytical and finite element calculation, when various parts of the shaft were analyzed. The design of the new shaft was carried out with the need to meet the previously set conditions. Modern materials have been used, which are beginning to be of great importance to the automotive industry. The calculations of the diploma thesis were performed in the Ansys Workbench 2019R3 software, in which the ACP Preprocessor and ACP Postprocessor superstructures were used.

Key words

shaft, Vector 06, composite, joints, student formula

Obsah

Seznam zkratk a značení – Latinská abeceda.....	9
Seznam zkratk a značení – Řecká abeceda.....	10
1. Úvod.....	11
1.1. Popis Formula Student.....	11
1.2. Hnací hřídele.....	13
1.2.1. Kloubové hnací hřídele.....	13
1.3. Hnací klouby.....	14
2. Rešerše kompozitních materiálů	17
2.1. Definice kompozitu.....	17
2.2. Dělení kompozitu.....	17
2.2.1. Dle materiálu výztuže.....	17
2.2.2. Dle materiálu matrice	17
2.2.3. Dle geometrického tvaru výztuže	18
2.2.4. Dle použití	19
2.3. Kompozitní vlákna.....	19
2.3.1. Mechanické vlastnosti kompozitních vláken.....	19
2.3.2. Technologie výroby a použití vybraných vláken	20
2.4. Matrice kompozitů.....	22
2.4.1. Termosety	23
2.4.2. Termoplasty	25
2.5. Výroba kompozitů	29
2.5.1. Ruční kladení.....	29
2.5.2. Pultruze (Tažení)	30
2.5.3. Vinutí vláken	31
2.5.4. SMC.....	32
2.5.5. Vakuové formování kompozitů	32
2.5.6. Tlakové formování kompozitů	33
3. Stanovení maximálního kroutícího momentu a koeficientu tření	34
4. Kontrola současného hřídele	36
4.1. Kontrola hladké části hřídele analytickým výpočtem.....	36
4.1.1. Analytický výpočet kontroly hřídele	36
4.2. Kontrola hladké části hřídele konečno prvkovým softwarem	36

4.2.1.	Tvorba materiálového modelu.....	36
4.2.2.	Geometrický model	38
4.2.3.	Konečno prvkový model	38
4.2.4.	Okrajové podmínky	39
4.2.5.	Výsledky.....	39
4.3.	Kontrola drážkovaného spoje 2D.....	40
4.3.1.	Analytický výpočet.....	40
4.3.2.	Tvorba materiálového modelu.....	41
4.3.3.	Geometrický model	41
4.3.4.	Konečno prvkový model	42
4.3.5.	Nastavení kontaktu	42
4.3.6.	Okrajové podmínky	43
4.3.7.	Výsledky.....	44
4.4.	Kontrola hřídele 3D	44
4.4.1.	Tvorba materiálového modelu.....	44
4.4.2.	Geometrický model	45
4.4.3.	Konečno prvkový model	45
4.4.4.	Nastavení kontaktů	46
4.4.5.	Okrajové podmínky	46
4.4.6.	Výsledky.....	47
4.5.	Nastavení analýz.....	48
5.	Návrh nového hnacího hřídele	49
5.1.	Kontrola nově navrženého hřídele.....	49
5.1.1.	Materiálové modely.....	50
5.1.2.	Geometrický model	50
5.1.3.	Konečnoprvkový model	51
5.1.4.	Nastavení kontaktů	52
5.1.5.	ACP Preprocesor	52
5.1.6.	Okrajové podmínky	56
5.1.7.	Vyhodnocení výsledků	56
6.	Závěr	59
	Seznam obrázků	60
	Literatura	62

Seznam zkratek a značení – Latinská abeceda

Zkratka	Název	Jednotky
a	Zrychlení	$[ms^{-2}]$
d	Vnitřní průměr hřídele	[mm]
f	Koeficient tření	[-]
g	Gravitační zrychlení	$[ms^{-2}]$
h	Skutečná opěrná výška	[mm]
h_{tp}	Vzdálenost těžiště od os kol	[m]
i	Počet drážek	[-]
k	Korekční součinitel	[-]
l	Délka dotyku	[mm]
l_h	Délka hřídele	[mm]
m_{celk}	Celková hmotnost vozidla	[kg]
m_{jez}	Hmotnost jezdce	[kg]
m_{voz}	Hmotnost vozidla	[kg]
p	Tlak	[MPa]
r	Poloměr kola	[m]
CTE	Koeficient teplotní roztažnosti	$[K^{-1}]$
Ag	Stříbro	[-]
Al	Hliník	[-]
Al_2O_3	Oxid hlinitý	[-]
Au	Zlato	[-]
Co	Kobalt	[-]
Cr_3C_2	Karbid chromu	[-]
Cu	Měď	[-]
DDS	Sulfonydianilin	
D	d'Alambeirtova síla	[N]
D_h	Vnější průměr hřídele	[mm]
D_s	Střední průměr	[mm]
E	Youngův modul pružnosti	[MPa]
Et	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
E_T	Tangentní modul	[MPa]
Fe	Železo	[-]
FEM	Konečnoprvková metoda	[-]
F_h	Hnací síla	[N]
F_x	Síla v ose X	[N]
F_{y1}	Síla v ose Y pod přední nápravou	[N]
F_{y2}	Síla v ose Y pod zadní nápravou	[N]
G	Gravitační síla	[N]
HDPE	Polyethylen s vysokou hustotou	[-]
HDT	Tepelná výchylka	[%]
J_p	Polární kvadratický moment	$[mm^4]$
L	Rozvor kol	[m]
L_1	Vzdálenost předního kola od těžiště	[m]
L_2	Vzdálenost zadního kola od těžiště	[m]
LDPE	Polyethylen s nízkou hustotou	[-]
MDA	Methylen – dianilin	[-]

Mg	Hořík	[-]
M_h	Hnací moment	[Nm]
M_k	Kroutící moment	[Nm]
NH_2	Aminoskupina	[-]
Ni	Nikl	[-]
R	Vnější poloměr hřídele	[mm]
S	Plocha	[mm ²]
SAE	Společnost automobilových inženýrů	[-]
SiC	Karbid křemíku	[-]
SiO_2	Oxid křemičitý	[-]
Ti	Titan	[-]
TiC	Karbid titanu	[-]
WC	Karbid wolframu	[-]

Seznam zkratek a značení – Řecká abeceda

Zkratka	Název	Jednotky
ε_B	Inženýrské přetvoření na mezi kluzu	[-]
ε_{Bskut}	Skutečné přetvoření na mezi kluzu	[-]
ε_Y	Inženýrské přetvoření na mezi kluzu	[-]
ε_{Yskut}	Skutečné přetvoření na mezi kluzu	[-]
ε_{fkrit}	Tažnost	[%]
μ	Poissonovo číslo	[-]
ρ	Hustota	[kgm ⁻³]
σ_B	Inženýrské napětí na mezi pevnosti	[MPa]
σ_{Bskut}	Skutečné napětí na mezi pevnosti	[MPa]
σ_{Pf}	Pevnost vlákna	[MPa]
σ_{Pt}	Pevnost v tahu	[MPa]
σ_Y	Inženýrské napětí na mezi kluzu	[MPa]
σ_{Yskut}	Skutečné napětí na mezi kluzu	[MPa]
ω_{kr}	Kritická úhlová rychlost	Rad/s

1. Úvod

Nároky automobilového průmyslu jsou v dnešní době velice vysoké. Nejmarkantnější nároky a s tím i spojené změny lze pozorovat zejména v oblasti návrhu a v použitých materiálech. Již dříve byla v oblasti závodních automobilů nahrazena původně použitá ocel mnoha jinými materiály. V běžně užívaných vozidlech je tedy možné, všimnout si použití mnoha materiálů s různou jakostí a kvalitou. Hlavním důvodem je v tomto případě snaha o snížení výrobních nákladů jednotlivých dílů.

Tohoto trendu si všimli také studenti týmu Formula Student, kteří se starají o návrh a sestavení studentské závodní formule. Vozidlo se následně účastní studentských soutěží, jejichž vítěz má možnost uvést svůj prototyp do sériové výroby. Byl jsem tedy osloven skupinou studentů zabývajících se návrhem pohonu a nábojů formule, zda by bylo možné, provést návrh nového hřídele za použití novodobých materiálů. Dalším důvodem tohoto požadavku je samozřejmě i nutnost určité procentuální obměny konstrukce modelu Vector 06 oproti Vector 05, který je posledním sestaveným modelem.

Hlavním cílem této práce je kontrola a návrh hnacího hřídele, který bude následně použitý na studentské formuli. Konkrétně bude použit na modelu formule Vector 06. Není však vyloučeno, že hřídel navržený a zpracovaný v této práci bude použit i na dalších modelech. Obsahem výpočtu bude kontrola původního hřídele, návrh nového a stanovení maximálního hnacího momentu přeneseného závodní pneumatikou. Využito bude akceleračních zkoušek předchozího modelu formule. Z těchto zkoušek bude určeno maximální zrychlení formule a určen koeficient tření, který bude použit pro výpočet hnacího momentu. Následovat bude kontrola stávajícího hřídele přítomného na formuli Vector 05. Sledovanými hodnotami v kritických místech hřídele budou ekvivalentní napětí, smykové napětí a také tlak působící na drážkování hřídele. Díky takto zkontrolovanému hřídeli bude návrh nového hřídele snazší. Pro výrobu původního hřídele byla použita Chrom Molybdenová ocel a výroba byla svěřena firmě RCV Performance, která se zabývá výrobou mnoha hřídelů použitých v závodních vozidlech. Hlavním z důvodů návrhu nového hřídele bude použití moderních materiálů, které jsou schopny ušetřit poměrně velkou část hmotnosti. Bude nutné počítat s mnoha podmínkami, které musí takto navržený hřídel splnit. Tou nejdůležitější podmínkou bude provedení takového návrhu, který bude vyhovovat původně použitým nábojům a ráfkům závodních kol.

1.1. Popis Formula Student

Jedná se o unikátní projekt, ve kterém studenti technických oborů vysokých škol mezi sebou zápolí při vývoji, návrhu a konstrukci studentských závodních formulí. Takto navržené formule mezi sebou následně soutěží ve speciálních závodech, které jsou určené pro vozy formulového typu. Jedná se o soutěž s názvem Formula SAE, která byla pořádána jako první ve Spojených státech. Evropská podoba této soutěže vznikla v roce 1998. Soutěže studentských formulí však nejsou pořádány pouze na Americkém a Evropském kontinentu. Každoročně hostí tyto soutěže také řada exotických zemí, kterými jsou například Japonsko, Austrálie nebo Brazílie. Celkově bývá za jeden rok uspořádáno 12 soutěží po celém světě, ve kterých se utká více než 500 týmů. V současné době je soutěž rozdělena na dvě kategorie, kterými jsou kategorie formulí se spalovacími motory a s motory elektrickými. [16]

Jako hlavní cíl těchto soutěží je stavba a návrh závodní formule. Takto navržené formule musí splňovat stanovená pravidla vydaná společností SAE a měla by být výkonná, dobře ovladatelná, bezpečná a estetická. V dnešní době je také kladen důraz na ekologičnost a cenu formule. Úkolem je tedy postavení formule, která splňuje uvedené požadavky a následně je porovnávána s modely formulí

ostatních týmů. Nejlepší návrh poté putuje do výroby. Možným zákazníkem je následně amatérský závodník, který by chtěl takovouto formuli užívat v závodech. Důležitou informací je také fakt, že finanční prostředky pro návrh formule si každý tým zajišťuje sám. [16]

Vítězný tým je určen také podle jednotlivých testů, kterými formule v průběhu závodního klání prochází. Tyto testy jsou rozděleny do dvou skupin. První skupinou jsou disciplíny statické a druhou jsou dynamické. Statickými disciplínami jsou:

- a) konstrukce vozu – kontrola a hodnocení konstrukčního řešení a jeho vyspělost, je nutné doložit potřebné informace, kterými jsou výpočty a simulace,
- b) nákladová studie – hodnocení ceny vozu a správnost kalkulace pro „sériovou výrobu“,
- c) business plán – v této části je obhajován plán výroby prototypové formule před zástupci fiktivní firmy.

Jakmile proběhnou statické disciplíny následuje část, která se nazývá technická přejímka. Tato přejímka je sestavena ze tří částí, které kontrolují vybrané parametry vozu. Jsou jimi tyto parametry:

- a) technika a bezpečnost – zkoumá se, zda konstrukce vozu odpovídá všem pravidlům a probíhá zde zkouška pilotů,
- b) zkouška náklonu – v této zkoušce dochází k naklonění vozu o 30° a následně o 60° (během náklonu se nesmí vozidlo převrátit, nesmí z něj vytéct žádné provozní kapaliny a nesmí z něj nic vypadnout, tato zkouška je prováděna vždy s nejvyšším pilotem vozu),
- c) test brzd a hluku.

Posledními disciplínami, kterými jsou vozy podrobeny, jsou dynamické disciplíny. Mezi tyto disciplíny se řadí následující:

- a) ski pad – jedná se o jízdu na trati, která má tvar osmičky (hodnotí se kvalita a nastavení podvozku),
- b) akcelerace – na trati dlouhé 75 m je měřeno zrychlení vozu s pevným startem,
- c) autocross – lze nazvat také jízdou ovladatelnosti, která umožňuje hodnocení ovladatelnosti vozu, zrychlení a brzdění (z této disciplíny se je možné kvalifikovat do poslední disciplíny tzv. vytrvalostního závodu),
- d) vytrvalostní závod + spotřeba paliva – koná se na 22 km, během kterých je nutná výměna pilotů v polovině závodu (probíhá prověření všech systému ve voze, funkčnost, spolehlivost a spotřeba paliva).

Všechny výše zmíněné disciplíny (statické a dynamické) jsou bodovány. Každá disciplína má stanovený maximální počet bodů, který může tým získat. Celkem je možné získat 1000 bodů. Bodové hodnocení jednotlivých disciplín je uvedeno v následujících tabulkách. [16]

Tabulka 1: Bodování statických disciplín

Statické disciplíny	
Disciplína	Maximální zisk bodů
konstrukce vozu	150
nákladová studie	100
business plán	75

Tabulka 2: Bodování dynamických disciplín

Dynamické disciplíny	
Disciplína	Maximální zisk bodů
ski pad	50
akcelerační	75
autocross	150
vytrvalostní závod + spotřeba paliva	300 + 100

1.2. Hnací hřídele

Hnacími hřídeli jsou myšleny hřídele, které se starají o transfer hnacího momentu z převodovky do diferenciálu. Z diferenciálu je následně moment přenesen na kola automobilu, které tvoří hnanou nápravu. V dnešní době se objevují automobily s jednou nebo dvěma hnanými nápravami. V případě dvou hnaných náprav se nejčastěji jedná o automobily s pohonem 4 kol. Tento pohon je možné označovat jako pohon 4 x 4. Každá hnací náprava obsahuje 2 hnací hřídele. Z tohoto důvodu se u pohonu 4 x 4 vyskytují 4 hnací hřídele. Nejčastěji používaným typem hnacího hřídele je hřídel se dvěma klouby na obou koncích. Existují také hnací hřídele se třemi klouby na každém konci. Pro výrobu takového hřídele je možné použít různé typy materiálů přes ocelové materiály až po kompozitní. [17]

1.2.1. Kloubové hnací hřídele

Tento hnací hřídel je jeden z nejpoužívanějších. Jeho úkolem je přenos točivého momentu mezi dvěma převodovými ústrojími. Výstupné převodové ústrojí je povětšinou pohyblivě uloženo a jeho pohyb je definován po určité dráze. Hlavními důvody použití tohoto typu hřídelů je přenositelnost točivého momentu mezi polohově variabilními převodovými ústrojími a také mezi konstrukčně vzdálenými ústrojími. [17]

Kloubové hnací hřídele musí splňovat množství požadavků, kterým může být přenos točivého momentu s vysokou účinností a konstantním převodem. Je požadována také vysoká životnost takovýchto hřídelů, minimální nutnost údržby a nízký moment setrvačnosti. Kloubové hřídele bývají také rozděleny podle polohy v hnacím ústrojí. Jsou známy dvě polohy hnacího hřídele. Tyto polohy jsou:

- podélné (spojovací) – jsou rovnoběžné s podélnou osou vozidla a propojují převodovou a rozvodovou skříň,
- příčné – zajišťuje propojení diferenciálu s hnacími koly.

Posledním rozdělením je rozdělení podle převodu. V tomto případě existují dva typy kloubových hnacích hřídelů:

- hřídel s konstantním převodem – stále konstantní převod (nazývaný jako homokinetický),
- hřídel s proměnným převodem – převod se mění (nazývaný jako kardanový). [17]

Podélné hnací hřídele

Tento typ lze nazvat také jako spojovací hřídel. Takovýto hřídel určený pro standardní pohon je nejčastěji tvořen tenkostěnnou trubkou. Přední část hřídele je opatřena drážkováním připojující hřídel na hnací unašeč předního kloubu. Na zadní část je připojen unašeč druhého kloubu. Hlavní funkcí drážkování je posuv hřídele při svislých výkyvech nápravy.

Podélné hřídele se vyznačují zejména délkovým omezením těchto hřídelů. Toto omezení souvisí s ohybovými kmity, které mohou nastat při určité délce a určitých otáčkách hřídele. Hlavním ukazatelem pro kritické otáčky je vlastní frekvence ohybového kmitání. [17]

Podélné hnací hřídele jsou tedy namáhány zejména na:

- a) krut – únavové namáhání při proměnlivé úhlové rychlosti,
- b) otláčení – vyskytuje se v drážkování (při proměnné úhlové rychlosti),
- c) ohyb – ve vidlicích unašečů (při proměnné úhlové rychlosti),
- d) ohyb + krut ve vlastním hřídeli.

Teoretickou kritickou rychlost (viz rovnice 1.1) pro plný hřídel je možné určit z následujícího vztahu

$$\omega_{kr} = 1,28 \cdot 10^4 \cdot \frac{D_h}{l_h^2} . \quad (1.1)$$

V případě dutého hřídele je podoba vztahu následující

$$\omega_{kr} = 1,28 \cdot 10^4 \cdot \frac{\sqrt{(D_h^2 + d^2)}}{l_h^2} . \quad (1.2)$$

Příčné hnací hřídele

Hlavním úkolem tohoto typu hnacího hřídele je přenos hnacího momentu z diferenciálu na hnací kola a vyrovnávat rozdíly délek náprav při odpružení. Tento požadavek je lehce splnitelný u automobilů, které mají poháněná zadní kola. V případě pohonu předních kol se vyskytují určitá úskalí, která souvisejí s řiditelností předních kol. Hnací hřídele předních kol musí splňovat tyto funkce:

- a) přenos sil z diferenciálu na hnací kola,
- b) vyrovnávání délek při pružení,
- c) stejný chod předních kol při jejich natočení.

Vnitřní kloub hřídele se používá zásuvný, který slouží právě k vyrovnávání délky při pružení. Tento kloub umožňuje posouvání v ose hřídele v rozmezí 25 – 50 mm a umožňuje přizpůsobovat se ke změnám délky, ke kterým dochází.

Nepříznivě se mohou v tomto případě projevit různé délky příčných hřídelů. Následkem rozdílné délky hřídelů je špatná řiditelnost a horší jízdní vlastnosti. Delší hřídele jsou charakteristické nižší tuhostí než hřídele kratší. Pro hnanou zadní nápravu se používají hřídele s posuvnými klouby. Důvodem tohoto užití je to, že nedochází k natáčení kol při řízení vozidla. [17]

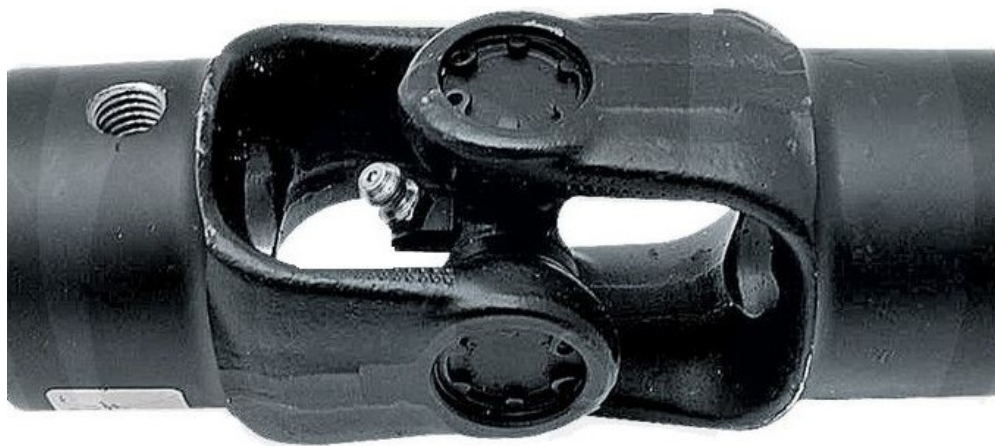
1.3. Hnací klouby

Hnacími klouby je rozuměno klasické rotační spojení dvou hřídelů. Existuje mnoho typů hnacích kloubů, které jsou používány dle konkrétního spojení hřídelů. Jsou tedy velmi důležité z hlediska zabezpečení správné funkce hnaných hřídelů. Trvalé spojení hřídelů by bez takovýchto hnacích kloubů nebylo možné. V dnešní době je již většina hnacích kloubů stejnoběžná. Tato vlastnost zajišťuje, že otáčky na vstupním hřídeli jsou stejné jako otáčky na hřídeli výstupním. [17]

Křížový kloub

Jeden z nejzastaralejších hnacích kloubů. Je možné jej znát také pod názvem Kardanový kloub. Tento typ kloubu není dobrý pro použití na předních hnaných nápravách, a to z toho důvodu, že není

schopen přenášet rovnoměrně úhlovou rychlost z hnacího hřídele na hnaný. Lze ho využít v situacích, kdy dojde k malé osově výchylce mezi hnacím a hnaným hřídelem. [17]



Obrázek 1: Křížový kloub [19]

Homokinetický kloub

Tento typ kloubu je hojně využíván u osobních automobilů, které mají velmi často hnanou přední nápravu. U této nápravy dochází k velkým osovým výchylkám, které je schopen tento typ kloubu vyrovnat. Zároveň je také charakteristický tím, že nepřenáší nerovnosti mezi hnacím a hnaným hřídelem. Homokinetické klouby umožňují přenos hnacího momentu i při velkém úhlu zalomení, který může být až 50° . [17]



Obrázek 2: Příklad homokinetického kloubu [18]

Hvězdicový kloub – Tripode

Jeho název je odvozen podle jeho tvaru, který připomíná trojramennou hvězdici. Pro tento typ hnacího kloubu je charakteristické nízké axiální namáhání, napomáhající jeho životnosti. Úhel zalomení se může u tohoto kloubu pohybovat až do úhlu 45° s axiálním posuvem do 55 mm.

2. Rešerše kompozitních materiálů

V této kapitole jsou shrnuty a definovány vybrané typy kompozitních materiálů. Jednotlivé podkapitoly se věnují základním vlastnostem kompozitů, dělení kompozitů a typům kompozitů. Dále jsou v této kapitole zpracovány základní typy výroby kompozitů a technologické prvky používané k výrobě kompozitů.

2.1. Definice kompozitu

Kompozitem jsou nazývány všechny materiály, které se skládají alespoň ze dvou hlavních komponent s výrazně se lišícími mechanickými vlastnostmi. Nejčastějším složením je pojivo a vláknová struktura. Vhodným poměrem těchto materiálů a správným zvolením technologie výroby kompozitu je možné dosáhnout vlastností, které nemá ani jeden materiál samostatně. Tomuto jevu se říká synergický efekt.

Nejznámějším a nejběžnějším kompozitem je velmi často využívaný železobeton. Tento kompozit je tvořen betonovou směsí, která je vyztužena ocelovými dráty. Využívá se nejčastěji ve stavebnictví. Dalším známým kompozitem je sklolaminát tvořený skelnými vlákny a pryskyřicí. Velmi hojně používaným kompozitem je kompozit složený z uhlíkových vláken, který je doplněn pryskyřicí.

2.2. Dělení kompozitu

Kompozitní materiály jsou z hlediska jejich různorodosti členěny do mnoha skupin dle různých hledisek. [1]

2.2.1. Dle materiálu výztuže

Rozdělení kompozitů dle materiálu výztuže může být různé. Základní rozdělení materiálů je na *kovy a nekovy*. Z kovů jsou to například Wolfram, Železo, Chrom, Molybden, Titan a slitiny těchto kovů. Pro nekovy existuje navíc rozdělení na organické a anorganické materiály. Anorganickými materiály mohou být zejména keramické materiály ($Al_2O_3, ZrO_2, SiC, TiC, WC, TiB_2, BN$), skla (E– sklo, S-sklo), C, B a čedič. V případě organických materiálů je možné se setkat s polymery (Aramidová vlákna – Kevlar) a polyamidovými vlákny (Nylon). [1]

2.2.2. Dle materiálu matrice

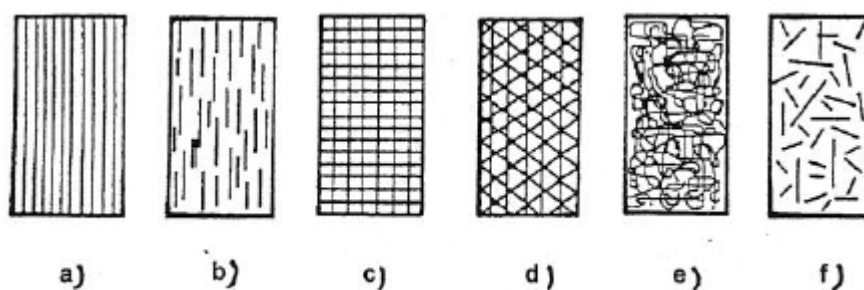
Matrice může být tvořena *kovovými materiály* ($Al, Ag, Au, Fe, Mg, Ti, Co, Cu, Ni$) a *slitinami těchto kovů*, nebo také *nekovy*, které jsou stejně jako u materiálů výztuže rozděleny na anorganické a organické materiály. Mezi anorganické můžeme zařadit keramické materiály ($Al_2O_3, SiC, SiO_2, TiC, Cr_3C_2$), skla (E, S) a uhlík. Organické materiály jsou například polymery (polyestery, vinylestery, fenolické pryskyřice, epoxidy, polyamidy a jiné).

Materiály použité pro vlákna a matici je možné kombinovat různými způsoby. Kompozity mohou být typu *kov – kov*, *polymer – polymer*, *keramika – keramika*, *keramika – polymer* atd. Musí být především splněna podmínka, že mechanické vlastnosti jednotlivých složek se výrazně liší. Důležitým faktorem u kombinace různých materiálů je dobrá mezifázová adheze, která zajišťuje přenos napětí mezi jednotlivými vrstvami. Konkrétně přenos napětí z vláken na matici. [2]

Existují také kompozity, u kterých je materiál výztuže stejný, pouze v jiné formě. Takovým kompozitem může být například žárupevný materiál, který je založen na základě oxidu siřičitého, jehož výztuž je ve formě tenkých vláken a matrice (pojivá složka) ve formě objemové. [1]

2.2.3. Dle geometrického tvaru výztuže

Dle tohoto rozdělení se můžeme setkat s *vláknovými, částicovými a skeletovými kompozity*. Za vláknové kompozity jsou označovány ty, které jsou tvořeny vláknovou výztuží a plastickým pojivem (matricí). Tato výztuž je nejčastěji orientována v jednom směru. Jako kompozit lze v tomto případě označit pouze materiály, které obsahují více než 5% výztuže. Vláknové kompozity jsou z velké části pevnější než běžné pevné látky ze stejného materiálu. Skutečná pevnost jednotlivých vláken je však nižší než pevnost vypočítaná a kompozity jako takové jsou schopny odolat i zatížení pod kterým by se jednotlivá vlákna trhala a deformovala. Velmi důležitou částí těchto kompozitů je pojivo (matrice), zajišťující ochranu výztuže proti vnějším vlivům.



Obrázek 3: Jednotlivé typy vláknových kompozitů

Na obrázku výše jsou zobrazeny jednotlivé typy vláknových kompozitů. Jednotlivými typy vláknových kompozitů jsou:

- a) jednosměrná dlouhá vlákna,
- b) jednosměrná krátká vlákna,
- c) dvousměrné vyztužení (křížová tkanina, rohož),
- d) vícesměrné vyztužení,
- e) náhodná orientace vláken,
- f) náhodná orientace krátkých vláken.

Dalším typem jsou částicové kompozity, které jsou tvořeny částicemi. Vyztužující částice jsou v těchto kompozitech dispergovány v matrici a z tohoto důvodu omezují tvorbu plastických deformací, zvyšují mez kluzu a mez pevnosti. Zlepšují také ostatní materiálové vlastnosti kompozitních materiálů, kterými jsou tepelná odolnost, útlum vibrací nebo elektrická vodivost. Další výhodou je také možnost zlevňování výsledného kompozitního materiálu. V tomto případě jsou do polymerů přimíchány částice z prášků, které jsou levnější než samotný polymer. Konkrétně mohou být použity částice křemenu, kaolinu, korundu a mastku. [3]

Posledním typem jsou kompozity skeletové, které jsou tvořeny pórovitou matricí. Tato matrice je prostoupena souvislým nosným skeletem. [1]

2.2.4. Dle použití

Takovýmto skupinami mohou být kompozity *žárupevné, žáruvzdorné, korozivzdorné a aplikace v různých strojírenských odvětvích*. Mezi takovéto odvětví patří například letectví, výrobní strojírenské technologie a stavebnictví.

2.3. Kompozitní vlákna

Kompozitní vlákna tvoří hlavní nosnou strukturu kompozitních materiálů. V následujících podkapitolách budou shrnuty základní poznatky týkající se kompozitních vláken a technologie výroby těchto vláken. [3]

2.3.1. Mechanické vlastnosti kompozitních vláken

Materiálové pevnostní charakteristiky jsou popsány přítomností nadkritických poruch. Tyto poruchy jsou dány místem, kde vzniká trhлина a odkud se trhлина šíří až k finálnímu lomu. Celkový počet těchto poruch je závislý na objemu materiálu, tj. na jeho rozměrech. Pro vlákna je tato skutečnost charakterizována Griffitovým vztahem (viz rovnice 2.1). Vztah je možné psát v následujícím tvaru:

$$\sigma_{Pf} = A + \frac{B}{d}, \quad (2.1)$$

kde A a B jsou materiálové konstanty a d je průměr vlákna.

Tento vztah je možné použít pouze v omezeném intervalu. V případě velice malého průměru vlákna $d \rightarrow 0$ by pevnost vlákna rostla nad všechny meze $\sigma_{Pf} \rightarrow \infty$. Skutečnost je však taková, že není možné překročit tak zvanou teoretickou pevnost vlákna $\sigma_{teor} \doteq E/10$. U tenkých vláken se objevuje negativní vliv délky vlákna na mez pevnosti σ_{Pf} v důsledku větší pravděpodobnosti poruch u delších vláken. [3]

Technologicky jsou kompozitní vlákna vyráběna ve svazcích. Tato technologie výroby způsobuje náhodné rozdělení poruch vyskytujících se ve vláknech. Poruchy vláken jsou místa, kde dochází k lokální koncentraci napětí. Tyto koncentrace však mohou mít rozdílné rozměry. Často dochází k tomu, že některá vlákna prasknou již při začátku zatěžování. Tento jev je také důvodem, proč je průměrná hodnota pevnosti vláken ve svazku stanovená jako nižší, než je pevnost jednoho vlákna.

Tabulka 3: Tabulka mechanických vlastností vybraných vláken

	E_t	σ_{Pt}	ρ	$\frac{\sigma_{Pt}}{\rho}$	ε_{fkrit}
	GPa	MPa	10^3 kgm^{-3}	MPa / kgm^{-3}	%
Sklo – E	72,4	3500	2,54	1,38	2,5
Sklo – S	85,5	4600	2,48	1,85	2,5
Grafit – E	390	2100	1,9	1,1	0,7
Grafit – S	240	2500	1,9	1,3	0,7
Bor	385	2800	2,63	1,1	0,8
Wolfram	414	4200	19,3	0,22	
Aramid kevlar 49	130	2800	1,5	1,87	2,5
Azbest	160	3100	2,56	1,21	1,9
SiC	250	2200	2,6	0,85	0,9
Polyethylen Spektra	172	3000	0,97	3,09	1,7
Ocel	210	340 - 2500	7,8	0,044 - 0,321	

V tabulce výše znamená E_t modul pružnosti v tahu, σ_{Pt} pevnost v tahu, ρ hustotu, $\frac{\sigma_{Pt}}{\rho}$ měrnou pevnost a ε_{fkrit} je tažnost.

2.3.2. Technologie výroby a použití vybraných vláken

Výroba kompozitních vláken je náročná. Jedná se o pokročilejší výrobní proces, jehož know – how je velmi často duševním vlastnictvím příslušné firmy. Prvotní materiál, který je použit pro výrobu, se velmi často liší od finálního materiálu. Je ale nutné, aby obsahoval všechny chemické prvky finálního materiálu.

V této práci jsou popisovány pouze základní technologie výroby vybraných vláken.

Skelná vlákna

Skelná vlákna jsou nejčastěji vyráběna tažením taveniny, která je připravená v platinových pecích. Takto vyrobená vlákna jsou následně ochlazována a opatřena ochrannou vrstvou, která brání odkysličování vlákna a zároveň zlepšuje adhezi a smáčivost s organickými matricemi. Výrobu skleněných vláken je tedy možné rozdělit do tří fází, kterými jsou:

- a) manipulace se surovinami,
- b) tavení a rafinace skla,
- c) formování a konečná úprava vláken.,

Nejčastěji se vyrábějí 3 druhy skla, kterými jsou:

- a) E – sklo = vhodná jako elektroizolační materiál, vysoce tuhé sklo,
- b) S – sklo = používá se jako ochrana před žářem, protože snáší teploty přes 1000 °C,
- c) C – sklo = je sklo odolné proti chemikáliím. [1]



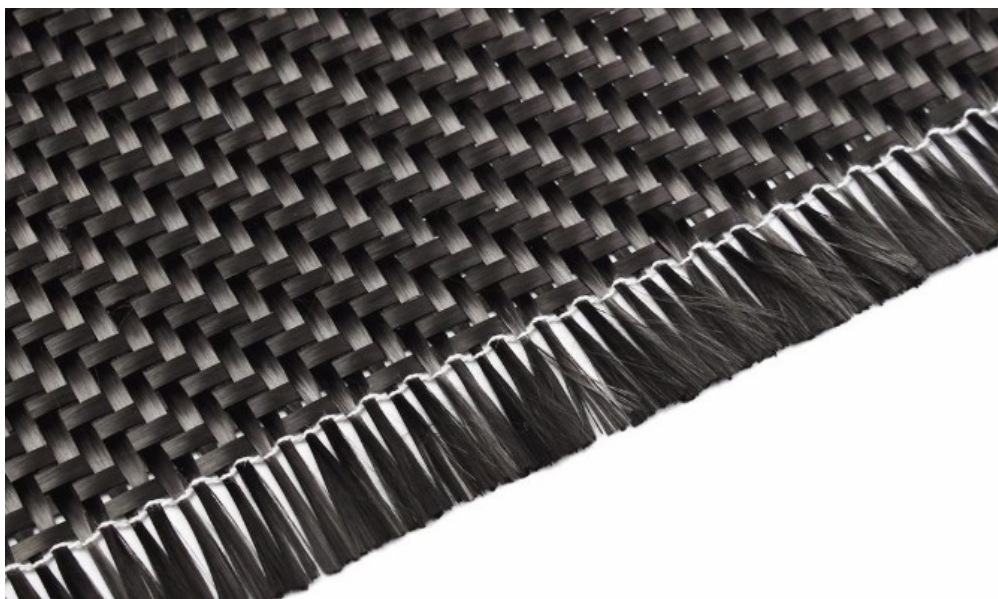
Obrázek 4: Skelná vlákna určená jako výztuha do betonu [7]

Uhlíková vlákna

Výroba uhlíkových vláken probíhá pomocí polyakrylonitrilových vláken, která jsou označována také jako PAN vlákna. Nejprve jsou tato vlákna zahřata a protahována k zajištění vhodné orientace molekul. Následných téměř 10 h slouží ke stabilizaci v okysličující atmosféře okolo 220–230 °C. Následuje grafitizace v inertním prostředí při 1000–1500 °C a následný protahovací proces. Dalším krokem je grafitizace v inertním prostředí pod napětím při teplotách 2500–3000 °C. Povrch takto vyrobených uhlíkových vláken je upraven oksyličněním, které zvyšuje adhezi na polymerní matici. [3]

Hlavní výhodou uhlíkových vláken je jejich tuhost a pevnost, která může být okolo 6900 MPa. Živice smoly, které jsou vyrobené ze smolů ropy a uhelného dehtu jsou charakteristické svou vysokou až extrémně vysokou tuhostí a nízkým až prakticky záporným axiálním koeficientem teplotní roztažnosti, který je označený jako CTE. Tyto vlastnosti jsou velmi často využívány v kosmickém průmyslu u kosmických lodí, které vyžadují vysokou teplotní odolnost zejména u přístrojů jako jsou řídicí jednotky atd. Ačkoliv jsou uhlíková vlákna mnohem pevnější než skelná nebo aramidová vlákna jsou méně odolná proti nárazům a při kontaktu s kovem může dojít také ke galvanické korozi. Této korozi je možné předejít užitím bariérového materiálu, kterým může být například laminát nebo vrstva epoxidu během vrstvení laminátu. [5]

Hlavní nevýhodou uhlíkových vláken jsou vysoké výrobní náklady. Z tohoto důvodu roste poptávka po cenově výhodnějších materiálech s podobnými vlastnostmi. V současnosti je takovýmto materiálem Lignin, který však z hlediska komerčního, není znám a odzkoušen natolik jako vlákna uhlíková. [5]



Obrázek 5: Tkanina z uhlíkových vláken [6]

Bórová vlákna

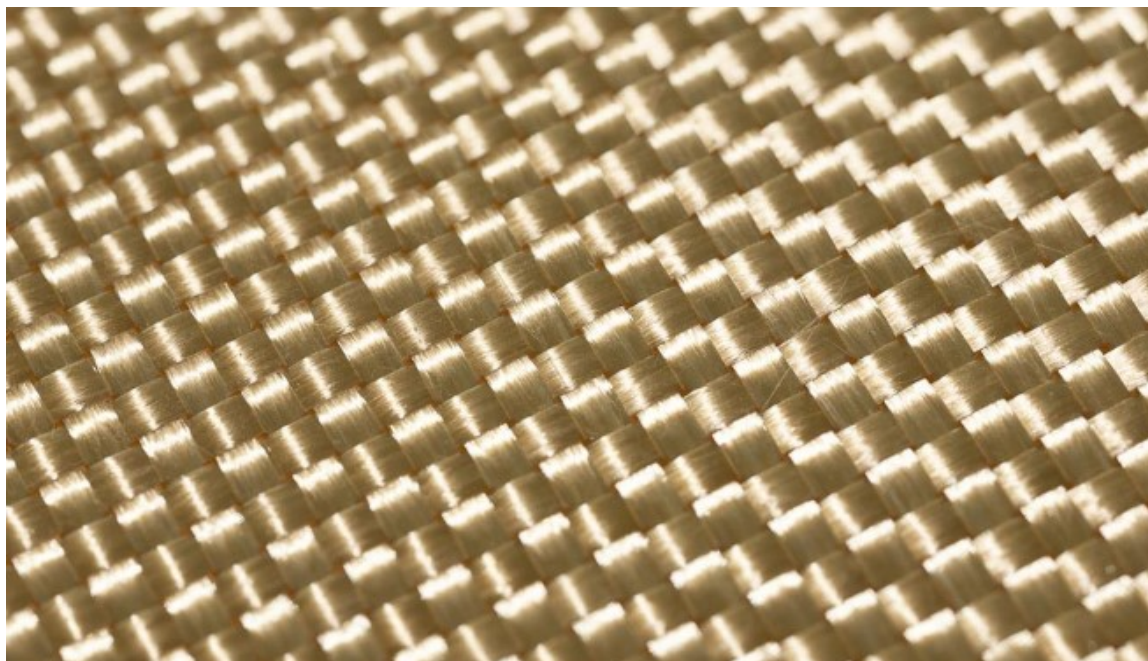
Vyrábí se vylučováním z plynné fáze halogenidu, konkrétně směsi trichlóru bóru a vodíku, na povrchu rozzhaveného vlákna z karbidu wolframu WC, které má průměr 10 μm. Výsledné vlákno má konečný průměr v rozmezí 0,1 – 0,2 μm. [3]

Výhodami Bórového vlákna je jeho vysoká tuhost, která může být až dvakrát vyšší než u ocelových vláken. Tato vlákna se vyznačují dobrou adhezí s matricí. Nevýhodou je potom vysoká hustota, která způsobuje nízkou měrnou pevnost. Z tohoto důvodu není možné bórové vlákno ohýbat a tkát. Tohoto vlákna se využívá zejména v plošných konstrukcích, kde je potřeba zajistit vysokou tuhost. [5]

Aramidová vlákna

V tomto případě se jedná o vlákno, které je označováno jako Kevlar 29 respektive Kevlar 49 pro letecké aplikace. Jde o organické vlákno, které je charakteristické vysokou pevností a malou měrnou hmotností. Toto vlákno také nabízí vyšší tažnost než vlákno uhlíkové, ale menší tažnost než skelné vlákno. Přesné chemické složení aramidového vlákna není známo. Vyrábí se rozpuštěním polymeru v koncentrované kyselině sírové a je vytlačován tryskami do studené vody. Ve vodě je vlákno propíráno a následně sušeno na cívkách. Vzhledem k hygroschopnosti je potřeba, aby bylo vlákno před impregnací vysušeno. [9]

Nejčastější použití aramidových vláken je v oblasti neprůstřelných vest a jiných pancéřovaných a balistických aplikacích. Slouží zejména k ochraně lidských osob a jako vojenská ochrana při útocích. Dále může být toto vlákno aplikováno také v oblastech, ve kterých je nutné zajistit dostatečnou odolnost proti nárazu. V tomto případě je využito zejména pro lopatky rotorů vrtulníků, lodní trupy a různé typy sportovního vybavení. [9]



Obrázek 6: Aramidová vlákna [8]

2.4. Matrice kompozitů

Matrice kompozitů funguje jako tzv. pojivo, jehož úkolem je zajistit celistvost nosné části a vytvoření vnějšího tvaru zajišťujícího správnou funkci tělesa. Pro materiálové vlastnosti kompozitu a matrice musí být splněny předpoklady tak, aby došlo k vytvoření požadovaného kompozitního materiálu. Specifické vlastnosti matrice lze vyjádřit takto:

- spojení vláken (části u částicových kompozitů) v jeden spojitý celek,
- zajistí zatížení vláken v místech vnějšího zatížení, v místech přerušení vláken, mezi vlákny u krátko vláknových kompozitů, mezi nerovnoměrně zatíženými vlákny, přemostuje trhliny ve vláknech atd.,
- vytváří vnější funkční povrch tělesa a jeho vzhled.

Hlavním mechanickým požadavkem na matici je dobrá adheze (přilnavost) k výztuži a dobrá mezní tažnost ε_{fkrit} . [3]

Nejčastěji jsou používány organické polymerní matrice. Termosety a termoplasty jsou základními typy pryskyřice, které jsou používány při výrobě pokročilejších kompozitů. [9]

2.4.1. Termosety

V dnešním moderním průmyslu dominuje zejména použití termosetových pryskyřic nad pryskyřicemi termoplastickými. Klíčovým krokem pro výrobu materiálu s termosetovými pryskyřicemi je použití vytvrzovacího činidla nebo tvrdidla a impregnace na výstužný materiál s následným vytvrzením. V následující tabulce jsou uvedeny základní vlastnosti vybraných termosetových pryskyřic.

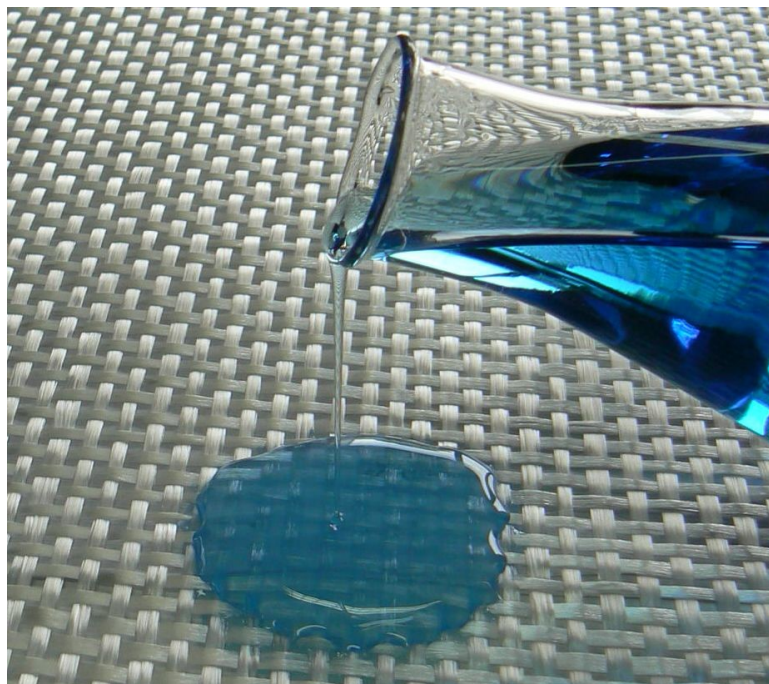
Tabulka 4: Vlastnosti vybraných termosetových pryskyřic

Pryskyřice	Hustota [g/cm³]	Mez pevnosti [MPa]	Youngův modul [GPa]	HDT [%]	Smrštění [%]	Teplota skelného přechodu [°C]
Epoxidová	1,2 – 1,3	55 – 130	2,75 – 4,1	48	1 – 5	100 – 270
Polyesterová	1,1 – 1,43	34,5 – 103,5	2,1 – 3,45	60 – 205	5 – 12	70 – 120
Vinyl esterová	1,12 – 1,32	73 – 81	3,0 – 3,5	93 – 135	5,4 – 10,3	102 – 150
Fenolická	1,00 – 1,25	30 – 50	3,6	165 – 175	0 – 0,01	260
Polyimidová	1,32	38,6	3,9	-	0 – 0,006	320 – 330
Polyuretanová	1,1 – 1,5	1 – 69	0,069 – 0,69	50 – 205	0,02	135

Epoxidové pryskyřice

Tento druh pryskyřic je charakteristický svou relativně nízkou molekulovou hmotností a nízkým procentem smrštění během vytvrzování. Smrštění při vytvrzování se u těchto pryskyřic pohybuje v rozmezí 1 – 5 %. Tento typ pryskyřic může být uchováván a skladován v částečně vytvrzeném stavu. Vytvrzené epoxidové pryskyřice mají velice dobré mechanické i tepelné vlastnosti a dobrou odolnost vůči chemikáliím a korozi. Teplota skelného přechodu u těchto pryskyřic se pohybuje v rozmezí 100 – 270 °C. Nevýhodou oproti polyesterovým pryskyřicím je vyšší cena. [9]

Hlavní složkou těchto pryskyřic je vytvrzovací činidlo nebo tvrdidlo. Tyto sloučeniny řídí reakční rychlost a určují výkonové charakteristiky hotového dílu. Nejčastěji používanými vulkanizačními činidly, která jsou používána v pokročilém průmyslu kompozitů, jsou aromatické aminy. Jedná se například o methylen – dianilin (MDA) a sulfonyldianilin (DDS). [9]



Obrázek 7: Tekutá epoxidová pryskyřice

Polyesterové pryskyřice

Jedná se o skupinu pryskyřic, které jsou hojně využívány vzhledem k dobrým mechanickým vlastnostem, kterými tyto pryskyřice disponují. Jedná se o dobrou odolnost vůči korozi, nízkou hmotnost a nízké náklady. Pevnost těchto pryskyřic v tahu se pohybuje okolo 34,5 – 103,5 MPa. Skelný přechod se pohybuje v rozmezí 70 – 120 °C. Tato teplota je nižší než u epoxidových pryskyřic. [9]

Tyto pryskyřice jsou tvořeny lineárními polymery s dlouhým řetězcem rozpuštěným ve vinylovém monomeru. Nenasycenými polyesterami jsou myšleny kombinace bezvodých forem nasycených a nenasyčených dikarboxylových kyselin. Místa, ve kterých nedojde k nasycení v polymerních řetězcích, jsou reaktivní a zesítují se monomerním styrenem prostřednictvím volného radikálu. Iniciátorem pro tyto pryskyřice je peroxidový katalyzátor. Rychlost reakce může být ovlivněna použitím urychlovače při působení určité teploty. Takovýmto urychlovačem může být například oktoát kobaltu. [9]

Pro tento typ pryskyřice by měl existovat čas, který je potřebný pro přeměnu pryskyřice z kapalného skupenství na skupenství pevné. Tohoto je možné dosáhnout pomocí inhibitorů, které zpomalují celou síťovací reakci. Jako inhibitory je možné použít chininy nebo katecholy. Zvýšením teploty však můžeme tuto síťovací reakci urychlit. [9]

Polyuretanové pryskyřice

Další skupinou pryskyřic, používaných v kompozitním průmyslu jsou polyuretanové pryskyřice. Jedná se o velice rozsáhlou skupinu, která má velice široké pole mechanických a fyzikálních vlastností. Mohou jimi být pevné hmoty, ale také měkké gumy. Z těchto pryskyřic je možné vyrobit nejrůznější díly a součásti pro modelová zařízení ve slévárenství, formy pro zpracování plastů, prototypové díly nebo také funkční díly sloužící pro přístroje a zařízení. [11]

Polyuretanové pryskyřice jsou tvořeny reakcí mezi polyolovou a izokyanátovou sloučeninou. Izokyanátovou složkou bývá nejčastěji diizokyanát toulenu. Dalšími příklady mohou být například metylen diizokyanát a hexametyl diizokyanát. [9]

Polyuretany jsou univerzálními polymery, které mají velice dobrou pevnost v tahu. Hodnota pevnosti v tahu se pohybuje mezi 1 – 69 MPa. Nejčastěji se tento typ pryskyřice používá při výrobě strukturálních pěn, které jsou vyztuženy vlákny. [9]

Fenolické a Amino pryskyřice

Tento typ termosetických pryskyřic je velice levný a má velice dobré mechanické, elektrické a tepelně izolační vlastnosti. Pevnost těchto pryskyřic v tahu se pohybuje v rozmezí hodnot od 38 do 48 MPa. Aminopryskyřice se vyrábějí řízenou reakcí formaldehydu s různými sloučeninami, které obsahují aminovou skupinu NH_2 . [9]

Fenolické pryskyřice se velice často používají v modelárnách, kdy jsou použity v případě tvrzeného dřeva. Toto dřevo spojuje přednost přírodních a syntetických materiálů. Významné využití mají při výrobě slévárenských pískových forem nebo brusných kotoučů. Lze je také využít jako tmely, lepidla, licí pryskyřice, lakařské pryskyřice atd. Není však možné tyto pryskyřice použít v potravinářském průmyslu, protože by mohlo dojít k uvolnění nezreagovaného fenolu. Tato látka je zdraví škodlivá. [9]

Aminopryskyřice, které jsou nazývány také jako aminoplasty vznikají kondenzací již dříve zmíněných látek obsahující aminoskupiny NH_2 . Působením tepla nebo vytvrzujících látek přechází tyto pryskyřice na vytvrzené plasty. Tyto pryskyřice dosahují vyšší tuhosti a jsou na rozdíl od fenolických pryskyřic zdravotně nezávadné. Obvykle se nacházejí ve formě vodného roztoku, který je bezbarvý. Tuto pryskyřici je možné zahustit nebo sušit s ohledem na jejich stabilitu. Výstupem jsou poté viskózní roztoky nebo práškové hmoty. [8]

Polyimidové pryskyřice

Jedná se o relativně novou třídu materiálů, které se využívají pro vysokoteplotní aplikace v kompozitním průmyslu. Teplota skelného přechodu se pohybuje od 320 °C do 330 °C. Tepelná stabilita a odolnost proti plamenům je u těchto pryskyřic lepší než u pryskyřic epoxidových. Vyznačují se také vynikající pevností v nepříznivých podmínkách. Naopak mají velmi nízké hodnoty prodloužení a jsou křehké. [9]

2.4.2. Termoplasty

Jedná se o pryskyřice, které jsou v současné době používány v malé části výroby průmyslových kompozitů. Jsou to nereaktivní pevné látky, u kterých nedochází během zpracování k žádné chemické reakci. Finální produkt z těchto pryskyřic může být vyroben působením tlaku a teploty. Výhodou oproti termosetovým pryskyřicím je to, že termoplastické pryskyřice mohou být znovu zahřáty a přeformovány do jiného (nového) tvaru. Nejčastějšími příklady těchto typů pryskyřic jsou polyetylen, polystyren, nylon, polykarbonát, polysulfon atd. Mechanické vlastnosti vybraných termosetových pryskyřic jsou uvedeny v tabulce 5. [9]

Tabulka 5: Mechanické vlastnosti vybraných Termoplastických pryskyřic [9]

Pryskyřice	Hustota [g/cm ³]	Mez pevnosti [MPa]	Youngův modul [GPa]	HDT [%]	Smrštění [%]	Teplota skelného přechodu [°C]
Akrylonitril	0,88 – 3,5	24,1 – 73,1	0,78 – 6,1	65 – 220	-	105 – 109
Polystyren	1,02 – 1,18	17,9 – 60,7	0,3 – 3,35	62 – 98	0,002 – 0,008	83 – 100
Nylon (PA6)	1,12 – 1,14	41 – 166	2,6 – 3,2	68 – 85	0,003 – 0,015	47
Polykarbonát (lisovaný)	0,95 – 1,51	46,1 – 93,1	1,8 – 3,0	78 – 187	-	143 – 152
Polysulfonová	1,37 – 1,48	60 – 131	-	172 – 213	-	-
Polyetylenová, HDPE (plněná sklem)	0,94 – 1,53	11 – 113	0,7 – 13,6	51.7 – 127	0,001 – 0,003	-

Polyetylen (PE)

Jedná se o druh termoplastické pryskyřice, která je průsvitná. Pro mnoho produktových aplikací je tento typ pryskyřice dostatečně pevný, flexibilní a má široký rozsah teplot. Odolnost vůči korozi je u této pryskyřice rovněž vynikající.

V praxi existují dva typy polyetylenu, kterými jsou:

- polyetylen s nízkou hustotou (LDPE) – struktura s rozvětvenými řetězci,
- polyetylen s vysokou hustotou (HDPE) – struktura s přímým řetězcem.

Pevnost v tahu je u obou typů polyetylenu velmi rozdílná. V případě LDPE se pevnost v tahu pohybuje od 6,2 – 17,2 MPa. U pevnějšího polyetylenu HDPE je pevnost v tahu v rozmezí 20 – 37 MPa. Hlavní využití polyetylenů je v elektrických izolacích, chemických hadicích, domácích potřebách a obalech. [9]



Obrázek 8: Polyetylen ve formě granulí [13]

Polystyren

Je to čirý plastový materiál bez chuti a zápachu. Vyznačuje se značnou křehkostí v případě, kdy není upraven. Rázové vlastnosti polystyrenu je možné zlepšit kopolymerací s polybutadienovým kaučukem. Tento materiál má velmi dobrou rozměrovou stabilitu a je charakteristický nízkou hodnotou smrštění při vytvrzování. Tato hodnota se pohybuje okolo 0,002 – 0,008 %. Nevýhodou tohoto materiálu je vysoká náchylnost k napadení organickými rozpouštědly a oleji. V provozních teplotách má dostatečnou pevnost v tahu, která je udávána mezi 17,9 – 60,7 MPa. [9]



Obrázek 9: Příklad polystyrenu

Polyamid (Nylon)

Polyamidy neboli nylony jsou termoplastické materiály, které jsou charakteristické přítomností opakující se amidové skupiny v hlavní struktuře svého řetězce. Vzhledem ke svým vlastnostem jsou velmi populární a často používané v mnoha průmyslových odvětvích.

Hlavními vlastnostmi těchto materiálů jsou dostatečná pevnost v tahu, která bývá zpravidla mezi 41 – 166 MPa, dobrá houževnatost a dobrá chemická odolnost. Nejčastěji se polyamidy používají jako materiál pro výroby nemazaných ozubených kol, rychloměry, stěrače čelních skel, držáky antén a jiné mnohoúčelové aplikace. [9]



Obrázek 10: Polyamidová ozubená kola [12]

Polykarbonáty

Polykarbonáty tvoří další skupinu termoplastů obsahující ve své struktuře uhličitanovou skupinu. Vyznačují se relativně vysokou pevností v tahu, při pokojové teplotě. Pevnost se pohybuje okolo 62 MPa. Zároveň mají vysokou rázovou houževnatost. Konkrétně okolo 640 – 845 J/m. Disponují také vysokou teplotou odvádění tepla, dobrými izolačními vlastnostmi, odolností proti korozi a vysokou rozměrovou stabilitou. Nejtypičtější aplikací polykarbonátů jsou ochranné štíty, vačky, převody, součásti letadel, přilby, kryty a počítačové terminály. [9]



Obrázek 11: Aplikace polykarbonátu při výrobě ochranného štítu [14]

Polysulfony

Jedná se o pryskyřice, které jsou charakteristické přítomností sulfonové skupiny ve své struktuře. Tyto polymery jsou také velice známé svou houževnatostí a stabilitou při vysokých teplotách. Mají vysokou hodnotu deformační teploty. Tato hodnota se pohybuje okolo 174 °C při tlaku okolo 1,68 MPa. Pevnost těchto materiálů v tahu je také velice vysoká a pohybuje se okolo 70 MPa. [9]

Polysulfony jsou odolné vůči hydrolýze ve vodném kyselém a alkalickém prostředí. Nejčastěji se tyto polymery používají pro výrobu konektorů, televizních komponentů, kondenzátorových fólií, lékařských nástrojů a různých potrubí, které by měly odolat korozi. [9]

2.5. Výroba kompozitů

Technologie výroby jednotlivých kompozitů je závislá hlavně na použitém typu vlákna a typu matrice. V případě kompozitních materiálů s polymerní matricí je možné využít laminaci, tlakové vytlačování či tažení. Pro matrice, které jsou tvořeny kovovými materiály, jsou použity metody jako laminování, válcování nebo vytlačování. V následující tabulce jsou uvedeny také metody výroby pro krátkovláknové a dlouhovláknové kompozity. [1]

Tabulka 6: Technologie výroby kompozitních materiálů

Výrobní technologie	Dlouhé vlákno, organická matrice	Dlouhé vlákno, kovová matrice	Krátké vlákno
Ruční ukládání	x		x
Vakuování (Autokláv)	x		x
Lisování v přípravku	x	x	x
Navíjení	x	x	
Válcování tlakem		x	
Nastříkávání			x
Přenos kapalné matrice	x	x	x
Vytlačování		x	x
Tváření tahem	x	x	
Vstřikování			x
Prášková metalurgie			x

2.5.1. Ruční kladení

Tato metoda výroby kompozitních materiálů je jednou z nejjednodušších a nejčastěji používaných metod výroby polymerních kompozitů. Omezením pro tuto výrobu je výhradní použití polymerní matrice. Ručním kladením je možné vyrábět rozměrné komponenty, kterými mohou být například lodní trupy. Výrobu za pomoci ručního kladení lze rozdělit na dva typy:

- mokrý ukládání (wet lay-up),
- technika předimpregnace (pre-preg).

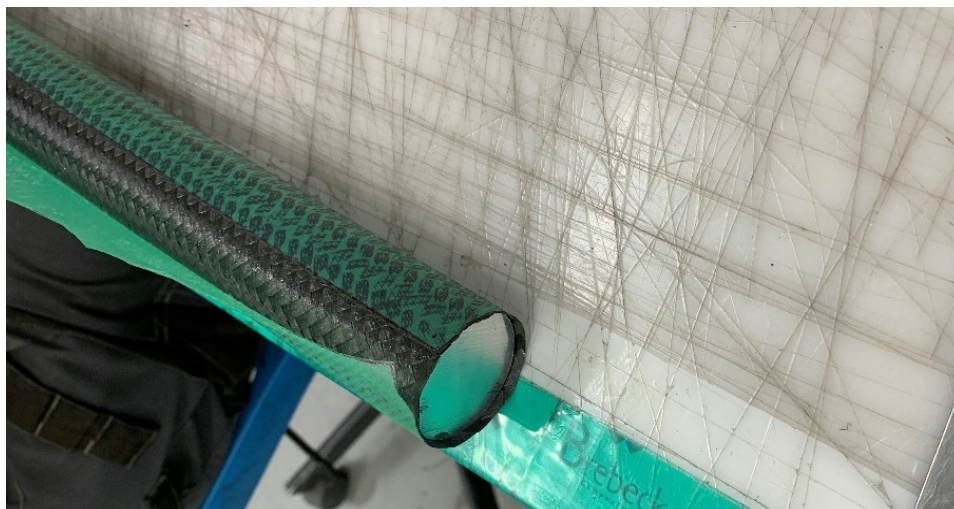
Mokrý ukládání

Tato technologie je založena na impregnaci vlákna kapalnou matricí, která je na vlákna nanášena štětcem nebo je stříkána pistolí. Vyztužující vlákna nebo tkaniny jsou nejprve vkládány do otevřené formy a až následně je aplikována pryskyřice. Smíchání pryskyřice a tvrdidla probíhá těsně před aplikací na vlákna. Vytvrzení takto aplikované pryskyřice na vlákna a tkaniny trvá mezi 24 - 48 hodinami. Díky použití urychlovačů a tvrdidel je možné provádět vytvrzení pryskyřice při pokojové teplotě. Bohužel nevýhodou této metody je velké množství nehomogenit ve struktuře pryskyřice. [1] [9]

Technika předimpregnace

V případě této techniky ručního kladení je již vlákno předimpregnováno u dodavatele. Dodavatelé nejčastěji používají tekutou matrici, která již obsahuje tvrdidlo a může tak dojít k částečné polymerizaci. Konečné vytvrzení a ztuhnutí takového kompozitu je prováděno v autoklávu finálního

výrobce za působení vyšší teploty. Nejčastěji se používají výztuže ve tvaru dlouhých vláken, krátkých náhodně uložených vláken nebo také ve formě tkaných rohoží (tkanin). [1]



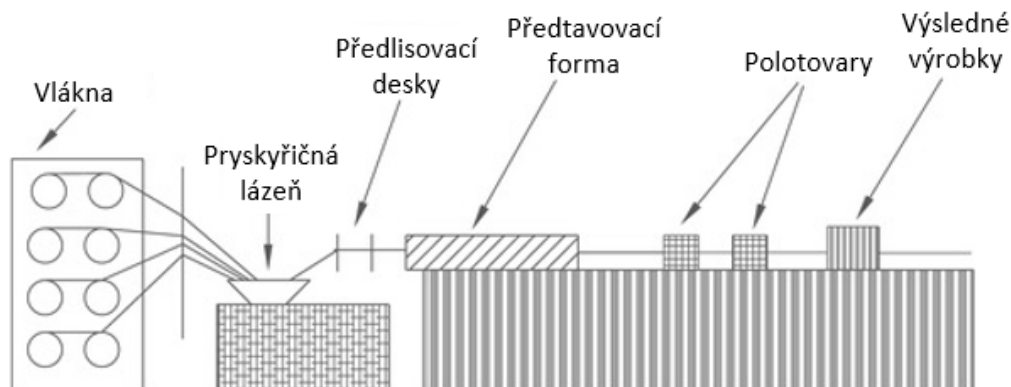
Obrázek 12: Ruční kladení předimpregnovaných tkanin

2.5.2. Pultruze (Tažení)

Jedná se o proces kontinuální výroby tažených vláken, které jsou vyztuženy pryskyřicí o různých tvarech a délkách. Jako vstupní materiál je použita směs tekutých pryskyřic a vláknové výztuže. Tento proces zahrnuje tažení materiálu přes vyhřívanou ocelovou formu, kde dochází k odstranění přebytečné pryskyřice a k částečnému formování výsledné komponenty. Průřez a povrchová úprava jsou dány tvarem a geometrií vyhřívané lisovnice. Pro adekvátní výslednou kvalitu je často potřebné následné vytvrzení. Pevností a hmotností je možné takto vyrobené profily srovnat se stejnými profily vyrobenými z hliníku nebo oceli. Nejčastěji používaným vyztužovacím materiálem jsou v tomto případě převážně skelná vlákna, která jsou ve formě rovingu nebo plošných rohoží. [9] [15]

Tento typ výroby je zajišťován tažnými stroji. O správné umístění rohoží a rovnoměrné rozmístění rovingu v průřezu se stará srovnávač, do kterého vstupují skelná vlákna navinutá na cívkách. V následujících zařízeních dochází ke smáčení vláken, rohoží a roušek v pryskyřicové směsi plniva, barviva a katalyzátoru. Výstupem z pryskyřicové lázně je polotovar, který má podobný tvar jako výsledný profil. Následuje předtvarovací forma, ve které dochází k vytlačení přebytečného pojiva a postupnému tvarování profilu. [9]

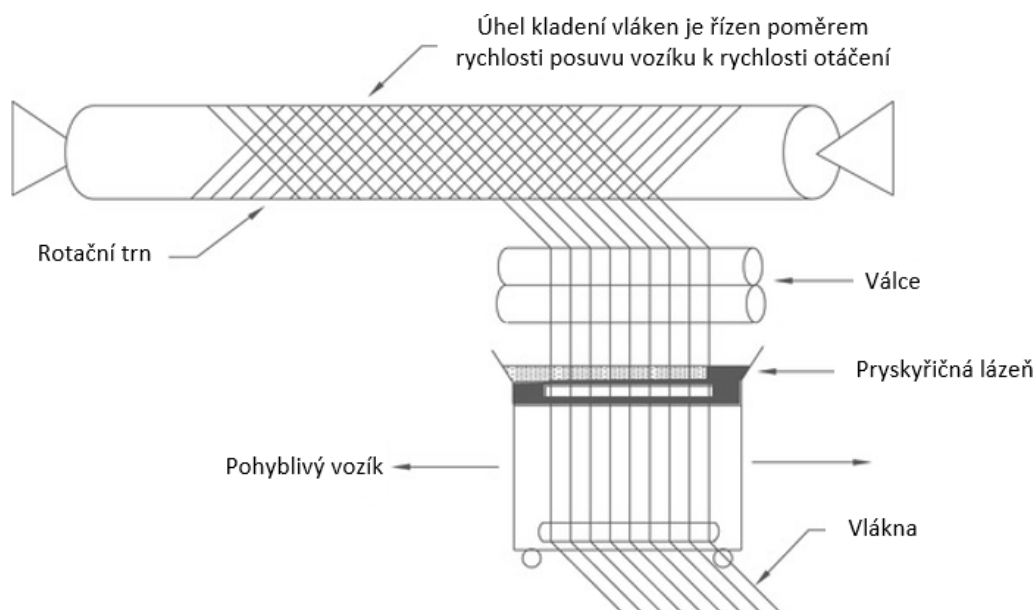
Mezi parametry ovlivňující stupeň a rovnoměrnost vulkanizace termosetových kompozitů během tažení patří zejména rychlost tažení a teplota formy. V případě, že chceme docílit požadovaného stupně vytvrzení s maximální jednotností materiálu, je nutné optimalizovat výše zmíněné parametry. K popisu a optimalizaci procesních proměnných, kterými jsou teplota matrice, rychlost tažení a tloušťka kompozitu, se používá bezrozměrný matematický model. Významný vliv na kvalitu produktu má zabalení vláken do matrice, použití uvolňovacích činidel, které jsou kompatibilní s pryskyřicí, a také typ vytvrzovacího činidla. Zároveň musí být dle použitého typu pryskyřice stanovena také rychlost tažení a zahřívací profil matrice. [9]



Obrázek 13: Schéma výroby tahovým procesem [9]

2.5.3. Vinutí vláken

Jedná se o velmi často využívaný proces výroby kompozitních materiálů. V tomto procesu je využíván rotační trn, na který se navíjejí již předimpregnovaná vlákna nebo výztuž v přednastavených vzorech. Výhodou této metody je velmi dobrá kontrola umístění jednotlivých vláken. Metoda mokré laminace je zobrazena na následujícím obrázku. [15]



Obrázek 14: Schéma navíjení vláken mokrou metodou [9]

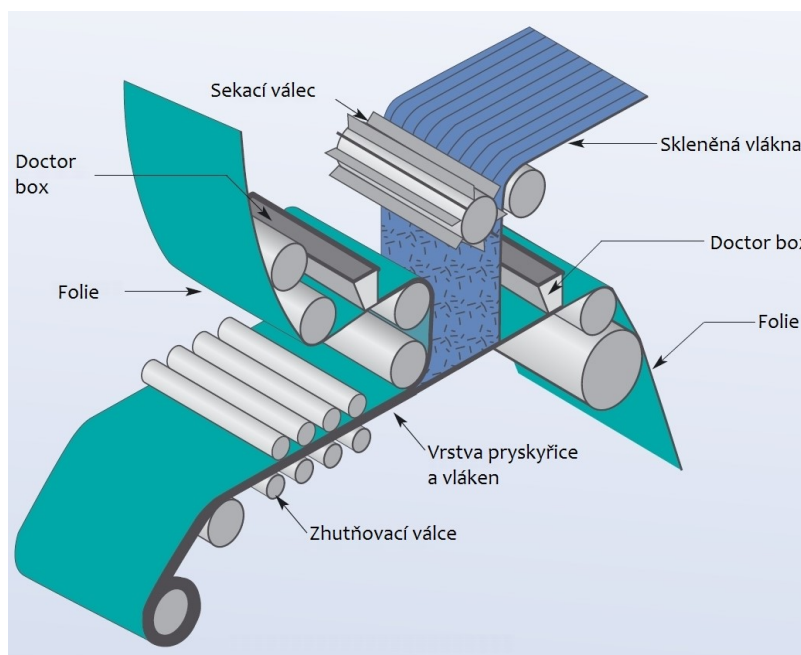
V tomto typu navíjení vláken prochází jednotlivá vlákna pryskyřičnou lázní a následně jsou navíjena na trn. Je velmi důležité, aby pryskyřičná lázeň měla nízkou viskozitu a nestekla tak z vláken. Naopak u suché metody navíjení jsou vlákna nejprve navinuta na trn a následně odstraněna. Odstraněná zapletená vlákna jsou zalita pryskyřicí. Nejčastěji se tento způsob využívá při výrobě tlakových nádob, raketových motorů, nádrží, potrubí a rybářských prutů. V dnešní době se touto metodou vyrábí také neválcové a nesférické díly. Typickými termosetovými pryskyřicemi používanými u vinutých vláken jsou polyester, vinylester, epoxidy a fenoly. [9] [15]

Navíjení vláken může být realizováno také pomocí robota. Vláknem je v tomto případě ukládáno podle navržené dráhy roboty a navinuté části jsou polymerovány v pecích. Tato metoda je vhodná pro navíjení asymetrických a velmi složitých geometrií. Velkým úskalím je mechanický výkon robota a složitost navíjené součásti. Tyto dva aspekty jsou ovlivněny dráhou vinutí vlákna. [9]

2.5.4. SMC

Název metody je z anglického Sheet Moulding Compound. Konkrétně se jedná o kompozitní materiál, který je z většiny tvořen pryskyřicí a nasekanými sklenými vlákny. Tento typ kompozitu je vyráběn nejčastěji ve formě plátů, ze kterých se vyřezávají potřebné díly. Takto vyřezané díly jsou následně vrstveny na sebe, za pomoci tepla a tlaku jsou zformovány do požadovaného tvaru a nakonec jsou vytvrzeny. SMC kompozity jsou hojně využívány ve stavebnictví, elektroinstalacích nebo automobilovém průmyslu. [15]

Výroba je realizována jako kontinuální proces, ve kterém je pryskyřice roztírána na plastovou fólii. Natřená fólie prochází pod zařízením, které se stará o sekání skelných vláken. Takto nasekaná skelná vlákna jsou rovnoměrně nanášena na vrstvu pryskyřice. Následuje nanášení druhé vrstvy pryskyřice. Tento polotovar prochází válci, které se starají o zhutnění a prosycení vláken. Takovýto materiál je možné uskladnit po dobu až tří měsíců. [15]



Obrázek 15: Schéma výroby SMC kompozitu [15]

2.5.5. Vakuové formování kompozitů

Je to postup výroby kompozitů, který se zakládá na zachycení vzduchu a odvodu přebytečné pryskyřice pomocí vakua. Prvním krokem při výrobě je vytvoření vrstvení. Následně je na toto vrstvení umístěna perforovaná fólie. Další vrstvou je textilie, která je vyrobena ze skelných vláken, netkaného nylonu nebo polyesterového úpletu, který absorbuje přebytečnou pryskyřici. Tuto vrstvu následuje odvzdušňovací vrstva z netkané textilie. Vakuový vak je umístěn na přírubě formy. Uvnitř vaku je vytvořeno vakuum, které umožňuje aplikaci tlaku až do jedné atmosféry. Zároveň tento proces zlepšuje adhezi mezi vrstvami. [9]

Hlavními výhodami této metody výroby je vyšší obsah vláken, nižší množství dutin, lepší smáčení vláken a snížení těkavých emisí ve srovnání s použitím ručního kladení. Nevýhodami je použití drahých a jednorázových pytlovacích materiálů, složitost postupu, vysoké riziko nekonzistentních výrobků a nutnost dobré zručnosti obsluhy. Nejčastějšími výrobky jsou zde velké výletní lodě a komponenty závodních aut. [9]

2.5.6. Tlakové formování kompozitů

Tato metoda výroby kompozitů je stejná jako vakuové formování kompozitů s tím rozdílem, že tlak bývá obvykle vytvořen stlačeným vzduchem nebo vodou. Takovýto tlak bývá aplikován na pružný vak, který zakrývá již dříve předimpregnovanou tkaninu (pre – preg). Aplikovaný tlak vytlačuje zachycený vzduch, páry a přebytky pryskyřice. Podobně jako při vakuovém formování kompozitů usnadňuje tato metoda navlhčení vláken. [9]

Tlakovým formováním se vytváří velmi kvalitní kompozitní materiály, které mají vysoký obsah vláken a nízký obsah dutin. Při použití této metody je potřeba využít jednorázový pytlovací materiál. Zároveň je potřeba dobrá odbornost obsluhy. Zlepšení formování je možné dosáhnout použitím autoklávu, který se používá pro vytvrzení kompozitu. Aplikovaná teplota v autoklávu může být vyšší a z tohoto důvodu je poté vytvrzovací reakce účinnější. Klesá také viskozita a zvyšuje se tak smáčení vláken. Nejčastěji se tímto postupem vyrábějí trupy lodí a stadionová letadla. [9]

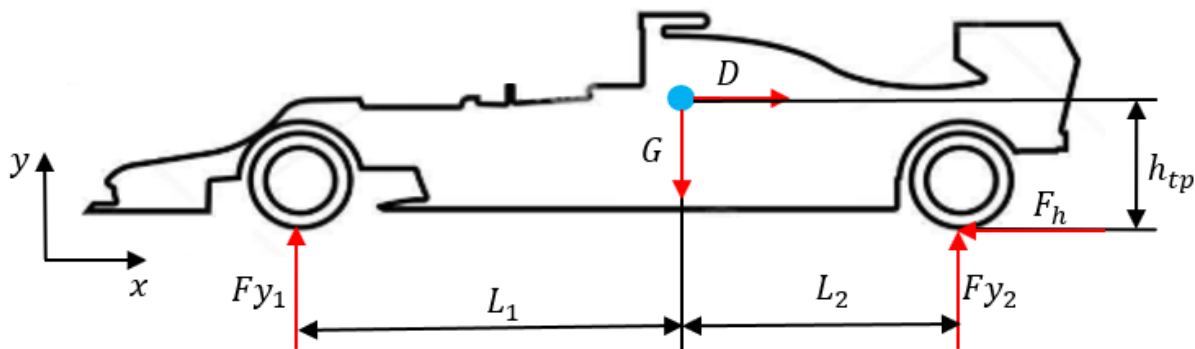
3. Stanovení maximálního krouťícího momentu a koeficientu tření

Maximální krouťící moment byl stanoven za pomoci vzorců, které vychází ze schématu uvolnění vozidla. V tomto uvolnění byl uvažován d'Alambertův princip. Maximální koeficient tření byl stanoven na základě maximálního zrychlení závodního vozidla, které bylo naměřeno členy týmu Formula Student při akcelerační zkoušce. Naměřená hodnota zrychlení byla $a = 11,772 \text{ m/s}^2$. V případě suchého asfaltu a suché závodní pneumatiky bylo nutné předpokládat vysokou hodnotu koeficientu tření, která nám zajistí přenos nejvyššího hnacího momentu. V následující tabulce jsou uvedeny rozměry a hmotnost závodního vozidla.

Tabulka 7: Rozměry a hmotnost vozidla

Rozměr / hmotnost	Hodnota
Hmotnost vozidla (m_{voz})	213 kg
Hmotnost jezdce (m_{jez})	75 kg
Hmotnost celková (m_{celk})	288 kg
Poloměr kola (r)	0,23 m
Rozvor kol (L)	1,6 m
Vzdálenost předního kola od těžiště (L_1)	0,88 m
Vzdálenost zadního kola od těžiště (L_2)	0,72 m
Vzdálenost těžiště od os kol (h_{tp})	0,31 m

Jako první bylo provedeno uvolnění a vyčíslení jednotlivých reakčních sil a momentů působících na vozidlo. Uvolnění je zobrazeno na následujícím obrázku.



Obrázek 16: Schéma sil působících na formuli

Výsledná hodnota koeficientu tření byla určena z momentové rovnice, která byla sestavena k přednímu kolu vozidla. V momentové rovnici bylo působení normálové síly F_{y2} uvažováno v rovině osy kola bez vlivu ramena valivého odporu. Výpočet koeficientu tření je popsán rovnicemi 3.1 – 3.12.

Suma sil v ose X:

$$\sum F_x = 0 \quad (3.1)$$

$$D - F_h = 0 \quad (3.2)$$

$$D = F_h \quad (3.3)$$

$$m \cdot a = F_h \quad (3.4)$$

$$m \cdot a = F_{y2} \cdot f \rightarrow F_{y2} = \frac{m \cdot a}{f} \quad (3.5)$$

Suma sil v ose Y:

$$\sum F_y = 0 \quad (3.6)$$

$$-G + F_{y1} + F_{y2} = 0 \quad (3.7)$$

Momentová rovnováha sestavená k přednímu kolu:

$$\sum M_1 = 0 \quad (3.8)$$

$$F_{y2} \cdot L - G \cdot L_1 - D \cdot h_{tp} = 0 \quad (3.9)$$

$$\frac{m \cdot a}{f} \cdot L - m_{celk} \cdot L_1 - m \cdot a \cdot h_{tp} = 0 \quad (3.10)$$

$$f = \frac{L}{\frac{g \cdot L_1}{a} + h_{tp}} \quad (3.11)$$

Po dosazení hodnot z tabulky 7 a vyhodnocení zrychlení z akcelerační zkoušky byl získán momentální koeficient tření mezi pneumatikou a asfaltem.

$$f = \frac{L}{\frac{g \cdot L_1}{a} + h_{tp}} = \frac{1,6}{\frac{9,81 \cdot 0,88}{11,772} + 0,31} = 1,533 \quad (3.12)$$

Výsledná hodnota koeficientu tření byla tedy 1,533. Koeficient tření byl následně dosazen do rovnice 1.4 a byla zjištěna hnací síla, která působí na zadní kolo. Tuto sílu je schopna pneumatika přenést bez prokluzu. Hnací síla byla rovna $F_h = 3390 \text{ N}$. Následně byl vypočítán maximální hnací moment, který působí na kolo. Tento moment byl vypočítán pomocí rovnice 3.13.

$$M_h = \frac{F_h}{2} \cdot r = \frac{3390,34}{2} \cdot 0,23 = 389,89 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (3.13)$$

V konečno prvkové simulaci byla hřídel zatěžována kroutícím momentem, který byl roven hodnotě $390 \text{ N} \cdot \text{m}$.

4. Kontrola současného hřídele

Kontrola současného hřídele bude prováděna v konečno prvkovém softwaru Ansys Workbench 2019R3. Nejprve byla kontrola provedena pomocí analytického výpočtu, který byl následně porovnán s výpočtem v konečno prvkovém softwaru.

4.1. Kontrola hladké části hřídele analytickým výpočtem

Následujícím krokem byla kontrola hladké části hřídele, která byla provedena v konečno prvkovém softwaru analytickým výpočtem. Hřídel byla zjednodušena tak, že bylo pro první kontrolu odstraněno drážkování, které zajišťuje přenos kroutícího momentu.

4.1.1. Analytický výpočet kontroly hřídele

Analytickým výpočtem byla kontrolována část tyče, která měla nejmenší průměr. Tato část se nacházela mezi dvěma částmi, které byly opatřeny drážkováním. Zátěžný moment byl uvažován jako maximální hnací moment, který je možné aplikovat a při kterém nedojde k prokluzu poháněného kola. Bylo nutné také vypočítat polární moment setrvačnosti. Výpočet probíhal podle následujících vzorců.

$$J_p = \frac{\pi}{32} \cdot D^4 \cdot \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4\right) = \frac{\pi}{32} \cdot 20,3^4 \cdot \left(1 - \left(\frac{12,7}{20,3}\right)^4\right) = 14\,117 \text{ mm}^4 \quad (4.1)$$

$$\tau_k = \frac{M_k}{J_p} \cdot R = \frac{390\,000}{14\,117} \cdot 10,15 = 280,4 \text{ MPa} \quad (4.2)$$

$$\sigma_{RED} = \sqrt{3 \cdot \tau_k} = \sqrt{3 \cdot 280,4} = 485 \text{ MPa} \quad (4.3)$$

Kde J_p je kvadratický moment průřezu, d vnitřní průměr, D vnější průměr, τ_k smykové napětí, M_k kroutící moment na hřídeli, R největší vzdálenost vlákna od osy rotace a σ_{RED} je redukované napětí.

Analytickým výpočtem byla tedy zjištěna výsledná hodnota smykového napětí 280,4 MPa a také hodnota redukovaného napětí 485 MPa.

4.2. Kontrola hladké části hřídele konečno prvkovým softwarem

Následně byla provedena kontrola v softwaru Ansys Workbench 2019R3. Cílem analýzy v konečno prvkovém softwaru bylo zjištění a porovnání hodnot napětí na hladké části hřídele. Zatížení hřídele bylo aplikováno jako statické.

4.2.1. Tvorba materiálového modelu

Materiálový model byl vytvořen na základě materiálového listu pro konkrétní materiál, který byl použit pro hřídel. Tímto materiálem byla chrom molybdenová ocel s označením 25CrMo4. Základní parametry tohoto materiálu jsou uvedeny v tabulce 8.

Tabulka 8: Materiálová data z materiálového listu

	25CrMo4
Youngův modul (E)	190 000 MPa
Poissonovo číslo (μ)	0,28
Mez kluzu (σ_Y)	460 MPa
Mez pevnosti (σ_B)	560 MPa
Přetvoření na mez kluzu (ϵ_Y)	0,002421
Přetvoření na mez pevnosti (ϵ_B)	0,215

Pro analýzu hřídele byl vytvořen Bilineární Isotropní materiálový model. Tento model je tvořen dvěma částmi. První část charakterizuje lineární část materiálového modelu. Plastická část je charakterizována mezí kluzu a tangentsním modulem. Jako první však bylo potřeba přepočítat hodnoty uvedené v tabulce 8 na hodnoty skutečného napětí a logaritmické poměrné deformace. Výsledné hodnoty napětí a logaritmické podélné deformace byly získány pomocí následujících vzorců.

$$\sigma_{Skut} = \sigma \cdot (1 + \varepsilon) \quad (4.5)$$

$$\varepsilon_{Skut} = \ln(1 + \varepsilon) \quad (4.6)$$

Tabulka 9: Skutečné hodnoty napětí a logaritmické deformace

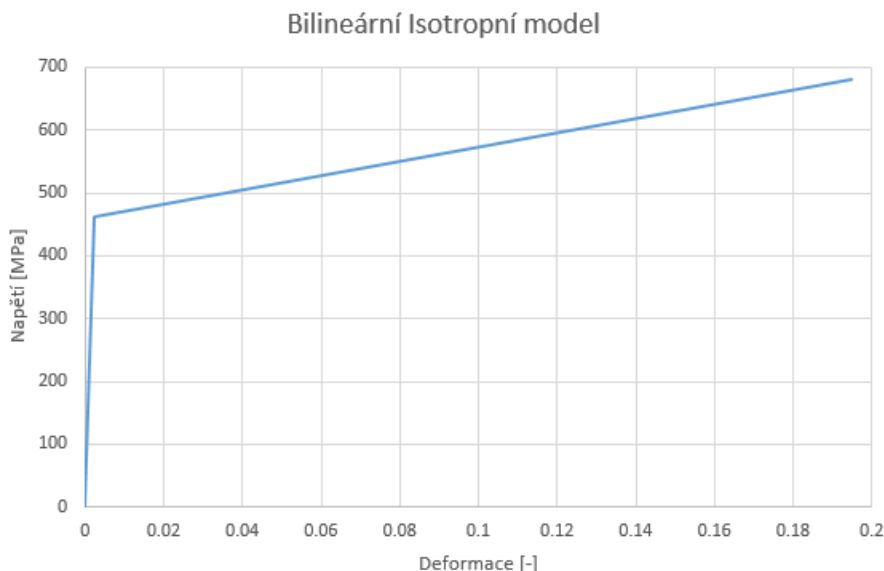
	25CrMo4
Mez kluzu skutečná (σ_{Yskut})	461,1 MPa
Mez pevnosti skutečná (σ_{Bskut})	680,4 MPa
Přetvoření na mezi kluzu (ε_{Yskut})	0.002418127
Přetvoření na mezi pevnosti (ε_{Bskut})	0,194744077

Ze skutečných hodnot byl následně vypočítán tangentsní modul, který udává sklon křivky udávající plastickou část křivky. Hodnota tangentsního modulu byla získána následovně:

$$E_T = \frac{\sigma_{Bskut} - \sigma_{Yskut}}{\varepsilon_{Bskut} - \varepsilon_{Yskut}} \quad (4.7)$$

$$E_T = \frac{680,4 - 461,1}{0,194744077 - 0,002418127} = 1140,18 \text{ MPa} \quad (4.8)$$

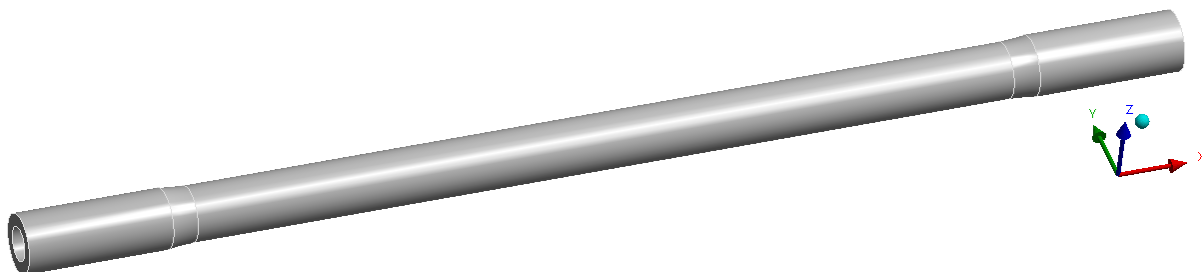
Výsledný bilineární model je zobrazen na obrázku 17.



Obrázek 17: Bilineární Isotropní model

4.2.2. Geometrický model

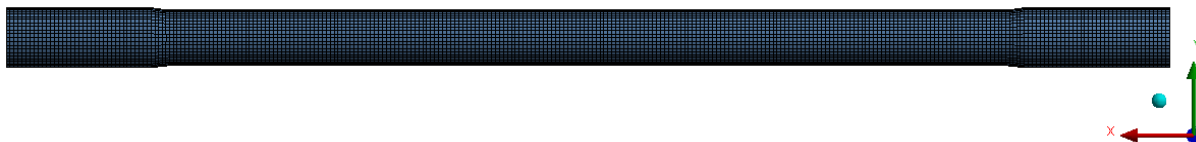
Geometrický model byl získán od členů týmu Formula Student. Tento model byl následně načten a zjednodušen v programu Spaceclaim. Hlavním důvodem zjednodušení bylo zkrácení výpočetního času. Zjednodušení se týkalo odstranění drážkování na koncích hřídele, které slouží k přenosu krouticího momentu z hřídele na tripody.



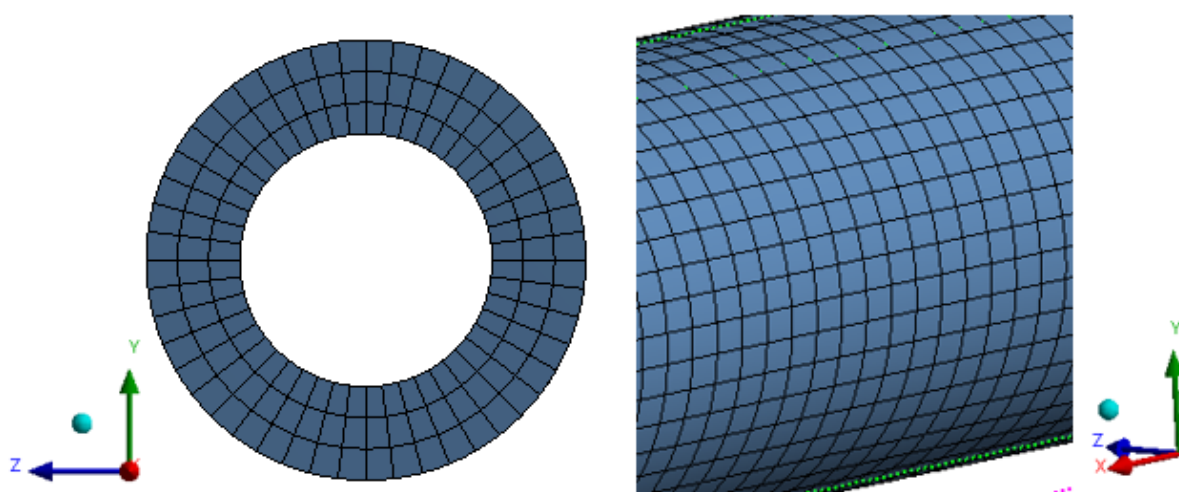
Obrázek 18: Geometrický model hladké hřídele

4.2.3. Konečno prvkový model

Z geometrického modelu byl následně vytvořen konečno prvkový model. Konečno prvková síť byla vytvářena s ohledem na působící zatížení. Hřídel byl vysítován pomocí hexa elementů (šestistěnů). V síti byly použity kvadratické elementy, které jsou definovány kvadratickou funkcí. Pro kvadratické elementy je také charakteristické, že jsou vybaveny meziuzly. Velikost elementů byla zvolena na 1,5 mm. Celkem bylo použito 42 290 elementů a 205 260 uzlů.



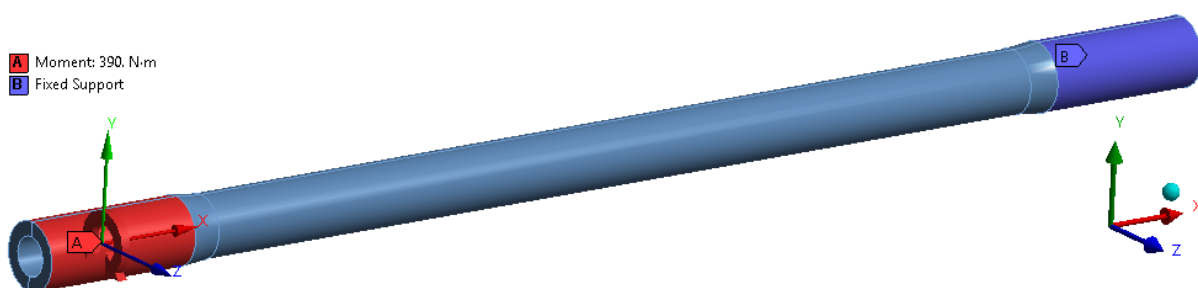
Obrázek 19: Konečnoprvkový model hřídele



Obrázek 20: Detail konečno prvkové sítě na hřídeli

4.2.4. Okrajové podmínky

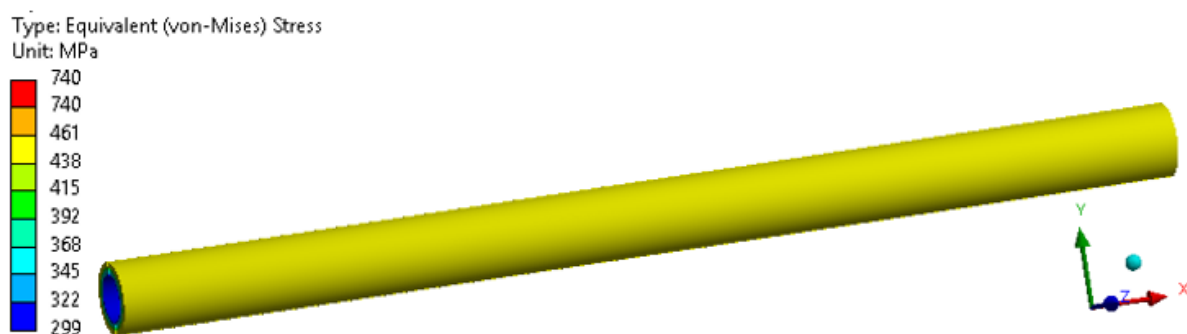
Okrajové podmínky byly aplikovány tak, aby co nejpřesněji simulovaly zatížení hřídele. V tomto případě bylo uvažováno, že vozidlo stojí na místě a dojde k přenosu maximálního krouticího momentu bez prokluzu poháněného kola. Stav, ve kterém nedojde k prokluzu, byl simulován pomocí okrajové podmínky zamezující posuvům ve všech osách a rotacím ve všech osách. Krouticí moment byl zadán pomocí okrajové podmínky definující moment, kdy rotace okolo os Y a Z byly nulové. Krouticí moment byl aplikován okolo osy X o hodnotě 390 Nm. Obě okrajové podmínky byly aplikovány v lokálním souřadném systému. Tento souřadný systém byl vytvořen v oblasti, kde byla aplikována okrajová podmínka definující moment. Aplikace okrajových podmínek je zobrazena na obrázku 21.



Obrázek 21: Aplikované okrajové podmínky

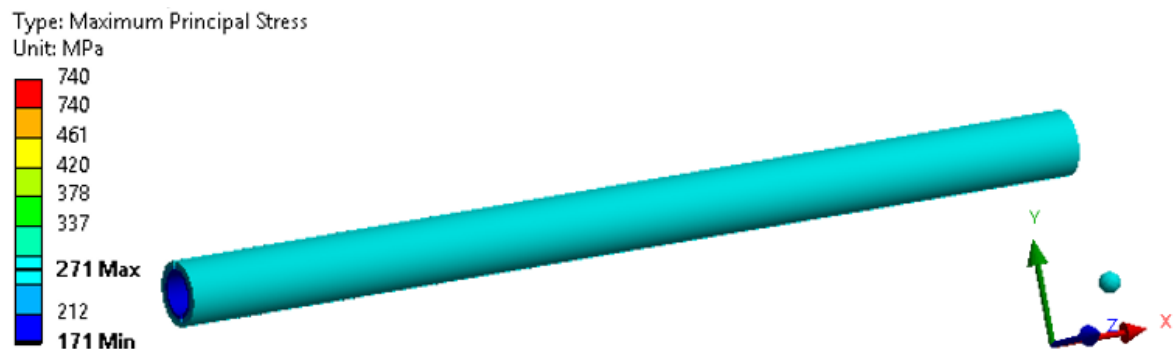
4.2.5. Výsledky

V této simulaci bylo vyhodnocováno redukované napětí podle hypotézy HMM. Dále bylo také vyhodnocováno první hlavní napětí a maximální smykové napětí. Všechny výsledky byly vyhodnocovány v konečném čase, protože se zde nacházelo také maximum všech napětí. Hlavním cílem této simulace byla kontrola hladké části hřídele. Bylo zjištěno, že v této oblasti nedojde k překročení meze kluzu, a tudíž nedojde ke vzniku plastické deformace. Toto zjištění odpovídá také reálnému stavu hřídele po zatěžování. Na hřídeli nejsou patrné žádné známky plastických deformací. Napětí v hladké části hřídele, která byla zkoumána, je rovno hodnotě 460 MPa.



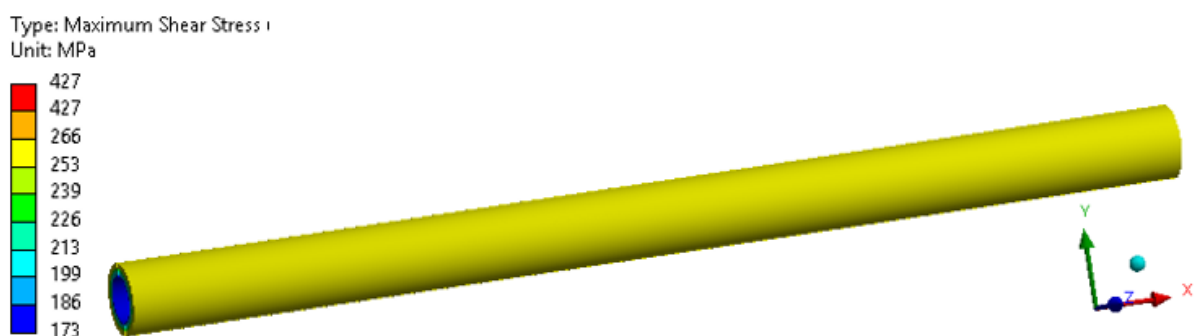
Obrázek 22: Redukované napětí na hřídeli

Kontrolou prvního hlavního napětí bylo zjištěno, že k překročení meze kluzu nedojde. Maximální napětí je 271 MPa.



Obrázek 23: První hlavní napětí na hřídeli

U smykového napětí byla maximální hodnota ve zkoumané oblasti rovna 265 MPa.



Obrázek 24: Smykové napětí na hřídeli

4.3. Kontrola drážkovaného spoje 2D

V této kapitole bylo kontrolováno drážkování hřídele, které zajišťuje přenos kroutícího vycházejícího momentu z motoru na hnané kolo. U drážkování bylo nutné provést kontrolu na otláčení.

4.3.1. Analytický výpočet

Nejprve byl proveden analytický výpočet. Rozměry potřebné k analytickému výpočtu byly odměřeny z 3D modelu hřídele. Tyto rozměry jsou uvedeny v tabulce 10.

Tabulka 10: Rozměry drážkování

	Hodnota
Délka dotyku (l)	24,1 mm
Střední průměr (D_s)	20,3 mm
Skutečná opěrná výška (h)	0,5716 mm
Korekční součinitel (k)	0,5
Počet drážek (i)	20

Při výpočtu bylo uvažováno, že všechny drážky jsou rovnoměrně v záběru. Kontrola drážkování na otláčení byla provedena dle vzorce 4.9.

$$p = \frac{F}{S} = \frac{2 \cdot M_k}{D_s \cdot l \cdot h \cdot k \cdot i} \quad (4.9)$$

Po dosazení hodnot z tabulky 5 do vzorce 1.21 získáme výslednou hodnotu tlaku, působící na jednu drážku. Výsledný tlak je roven hodnotě $p = 278,9 \text{ MPa}$. Tato hodnota tlaku je pro hřídel vyhovující.

4.3.2. Tvorba materiálového modelu

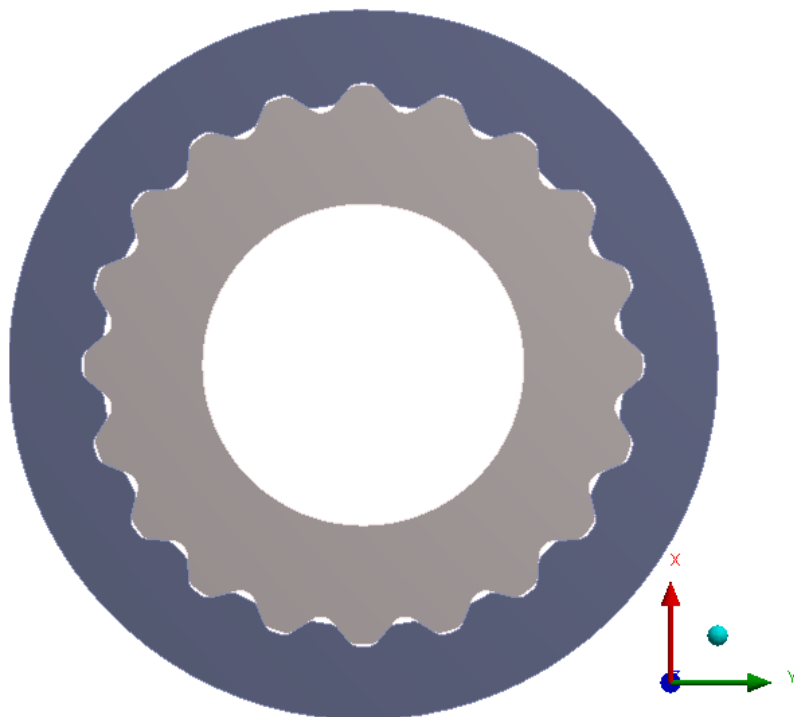
Použitými materiály byly tentokrát 2 materiály. Stejně jako v kapitole 4.2.1. byl použit materiál 25CrMo4. Druhým materiálem byla předdefinovaná strukturální ocel. Tento materiál byl použit z toho důvodu, že nebyl přesně známý typ oceli použitý pro tripody. Materiál 25CrMo4 představoval materiál použitý pro hřídel a ocel byla použita pro tripody. Pro materiál 25CrMo4 byl vytvořen bilineární isotropní model. Vzhledem k předpokladům byl pro ocel použit čistě elastický materiálový model. Parametry jednotlivých modelů jsou zobrazeny v tabulce 11.

Tabulka 11: Materiálové parametry použitých materiálů

	Youngův modul [MPa]	Poissonovo číslo	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]
25CrMo4	190 000	0,28	461	680
Ocel	200 000	0,3	-	-

4.3.3. Geometrický model

Geometrický model byl vytvářen na základě 3D modelu hřídele. Byly ponechány veškeré rozměry drážkování, ale na samotném drážkování byl přidán rádius o hodnotě R0,5. Takto modifikovaný model byl zjednodušen na rovinný 2D model. Následně byla zvolena pouze tloušťka tohoto drážkovaného spoje, která byla rovna délce drážkování. Nutností bylo také přenastavit typ analýzy na 2D. Hlavním důvodem tohoto zjednodušení byla nutnost použití konkrétního typu kontaktního algoritmu, který vyžaduje velice jemnou síť.



Obrázek 25: Zjednodušený geometrický model

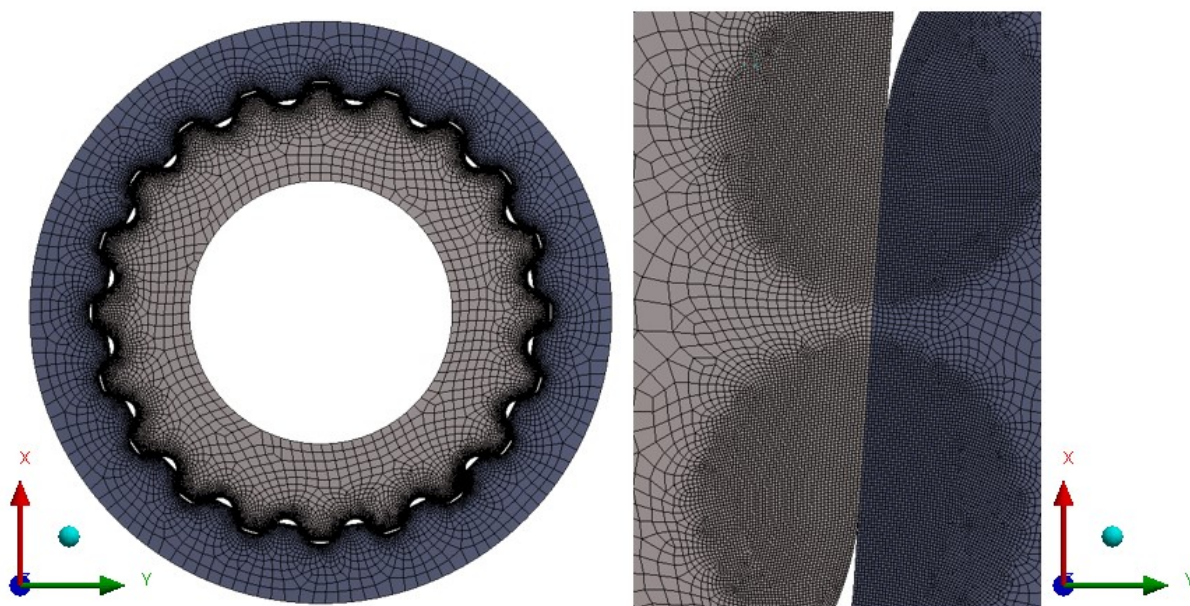
4.3.4. Konečno prvkový model

Konečno prvkový model byl vytvořen na základě zjednodušeného geometrického modelu. Bylo důležité vzhledem k následujícímu nastavení kontaktu vytvořit velice jemnou síť v oblasti kontaktu hřídele a tripodu. Velikost elementů byla zvolena na 0,5 mm pro hřídel a 1 mm pro tripod. Tato volba proběhla na základě pozdějšího nastavení Conta a Targe strany v kontaktu. Na všechny hrany byla také nastavena velikost elementu na 0,025 mm. V případě jedné drážky byla vytvořena extra jemná síť pro následné vyhodnocování výsledků. V této drážce byla síť zjemněna také do hloubky použitím síťovací metody, u níž se definuje pozice a poloměr kulové oblasti, v rámci které má být použita definovaná velikost elementů. Požadovaného zjemnění bylo dosaženo pomocí imaginárních koulí. Tyto koule měly následující parametry:

Tabulka 12: Tabulka rozměrů zjemňovací koule

	Hodnota
Poloměr koule	0,25 mm
Velikost elementů	0,005 mm

Celkově bylo v této analýze použito 181 100 uzlů a 58 214 elementů.

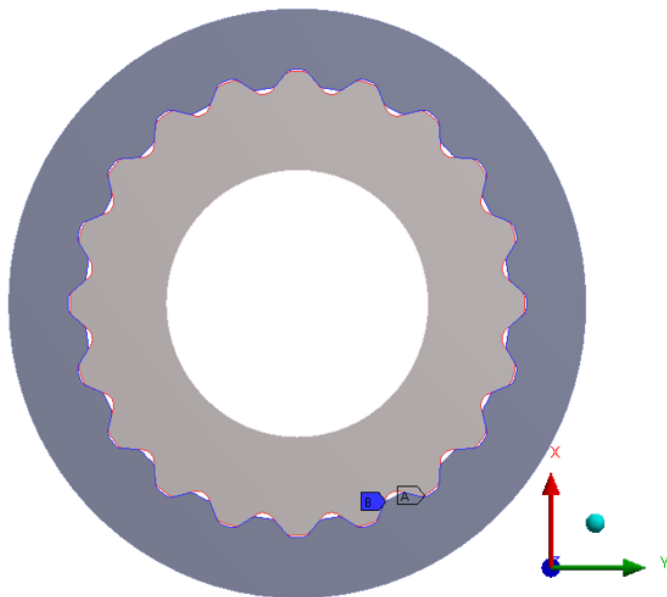


Obrázek 26: Konečno prvkový model s detailem sítě

4.3.5. Nastavení kontaktu

V této situaci, která byla simulována se nacházel pouze jeden kontakt. Tímto kontaktem byl kontakt mezi hřídelem a tripodem, umožňujícím přenos kroutícího momentu. Mezi těmito součástmi byl nastaven kontakt se třením a koeficient tření byl zvolen na hodnotu 0,2. Pro přesnější vyhodnocování byl kontakt rozdělen na dva. První kontakt byl definován na všechny drážky s výjimkou drážky, na které byla zjemněna síť. Druhý kontakt byl nastaven na onu drážku s jemnou sítí. V případě obou kontaktů byl volen kontaktní algoritmus Normal Lagrange. Tento algoritmus je charakteristický tím, že penetrace

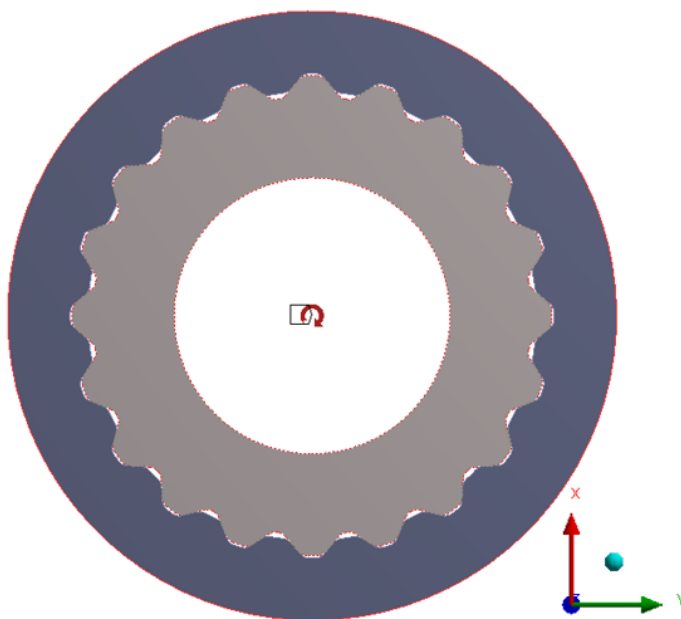
v tomto kontaktu je nulová. Díky podmínky nulové penetrace bylo možné vyhodnotit kontaktní tlak s požadovanou přesností.



Obrázek 27: Kontakt mezi hřídelí a tripodem

4.3.6. Okrajové podmínky

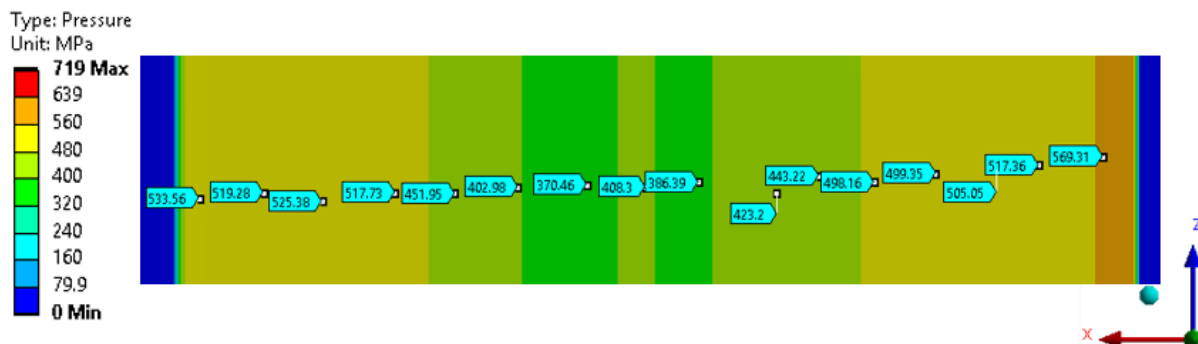
Okrajové podmínky byly voleny tak, aby odpovídaly reálnému zatížení hřídele. První okrajová podmínka byla aplikována na hřídel a zajišťovala nulové posuvy a rotace hřídele (simulující zatížení bez prokluzu kol). Druhá okrajová podmínka byla aplikována na geometrii tripodu, která simuluje vycházející kroutící moment z motoru. Tento kroutící moment byl roven hodnotě 390 Nm. Tato hodnota byla vypočítána v kapitole 3.



Obrázek 28: Aplikace okrajových podmínek na zjednodušeném modelu

4.3.7. Výsledky

Hlavním cílem této analýzy byla kontrola drážkování na otláčování. Kontrola byla provedena pomocí vyhodnocení kontaktních tlaků. Výsledky byly vyhodnocovány na drážce, na které byla zjemněna síť pomocí koulí. Kontaktní tlaky byly vyhodnoceny pomocí nástroje Contact Tool. Kontaktní tlak byl vyhodnocen jako aritmetický průměr průběhu tohoto tlaku na drážce v jednotlivých uzlech. Výsledná hodnota byla rovna tlaku 241,9 MPa. Průběh kontaktního tlaku je zobrazen na obrázku 29.



Obrázek 29: Průběh kontaktního tlaku na drážce

V tabulce 13 jsou vyobrazeny výsledky analytického a konečno prvkového řešení. Je zde také uvedena odchylka jednotlivých výpočtů.

Tabulka 13: Shrnutí výsledků pro kontrolu drážkování

	Analytické řešení	FEM	Odchylka [%]
Tlak	278,9 MPa	241,9 MPa	13

4.4. Kontrola hřídele 3D

Druhým úkolem v kapitole zabývající se kontrolou původní hřídele byla kontrola celého hřídele, který bude zatížen tripody.

4.4.1. Tvorba materiálového modelu

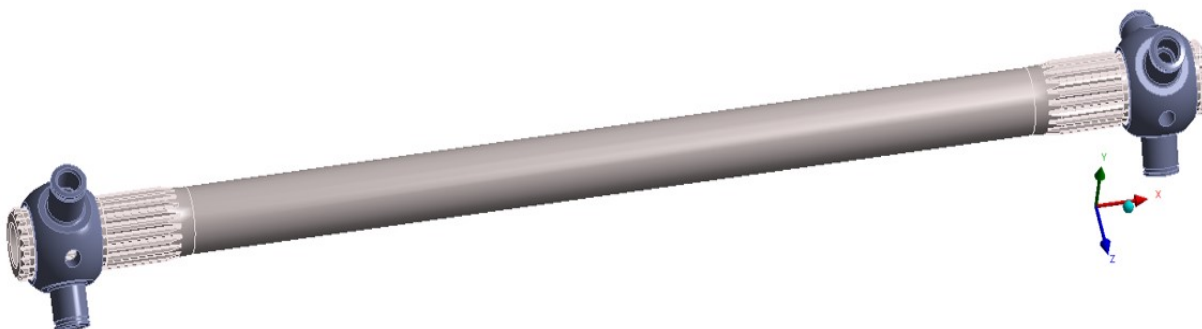
Byly použity stejné materiálové modely jako v kapitole 1.4.2. Konkrétně se jednalo o materiálové modely chrom molybdenové oceli 25CrMo4 a strukturální oceli. Pro prvně jmenovanou byl vytvořen materiálový model s bilineárním izotropním zpevněním. V případě strukturální oceli byl použit čistě elastický materiálový model. Tento model byl použit z materiálové knihovny programu Ansys Workbench 2019R3. Jednotlivé materiálové parametry jsou uvedeny v tabulce 14.

Tabulka 14: Materiálové parametry použitých materiálů

	Youngův modul [MPa]	Poissonovo číslo	Mez kluzu [MPa]	Mez pevnosti [MPa]
25CrMo4	190 000	0,28	461	680
Ocel	200 000	0,3	-	-

4.4.2. Geometrický model

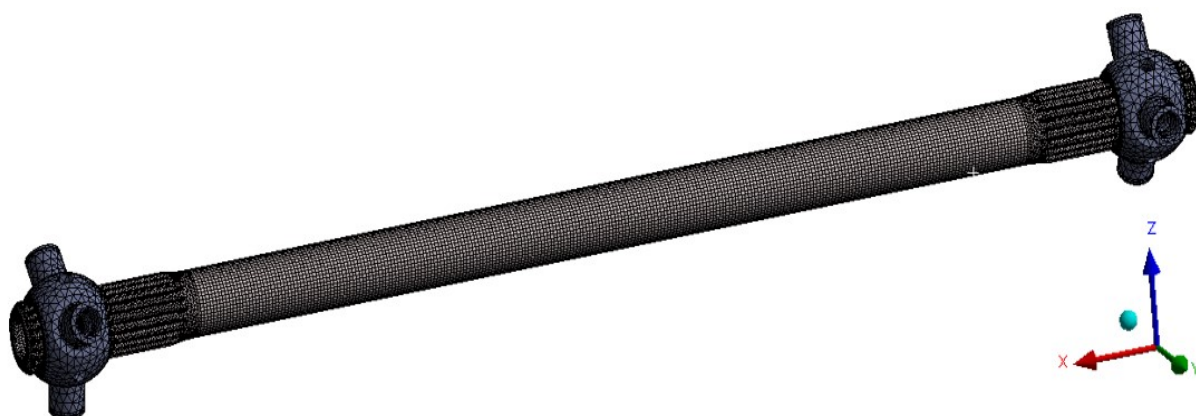
Geometrický model byl nepatrně upraven proti původnímu stp. modelu. Byl použit celý hřídel, u kterého bylo na jednotlivých drážkách doděláno zaoblení o hodnotě R0,5 mm. Stejně zaoblení bylo domodelováno také na tripodech, které byly nepatrně zjednodušeny. U tripodů, které byly použity v analýze, byly odstraněny ložiska a nepotřebné zaoblení. Použitou geometrii můžete vidět na obrázku 30.



Obrázek 30: Geometrický model hřídele s tripodý

4.4.3. Konečno prvkový model

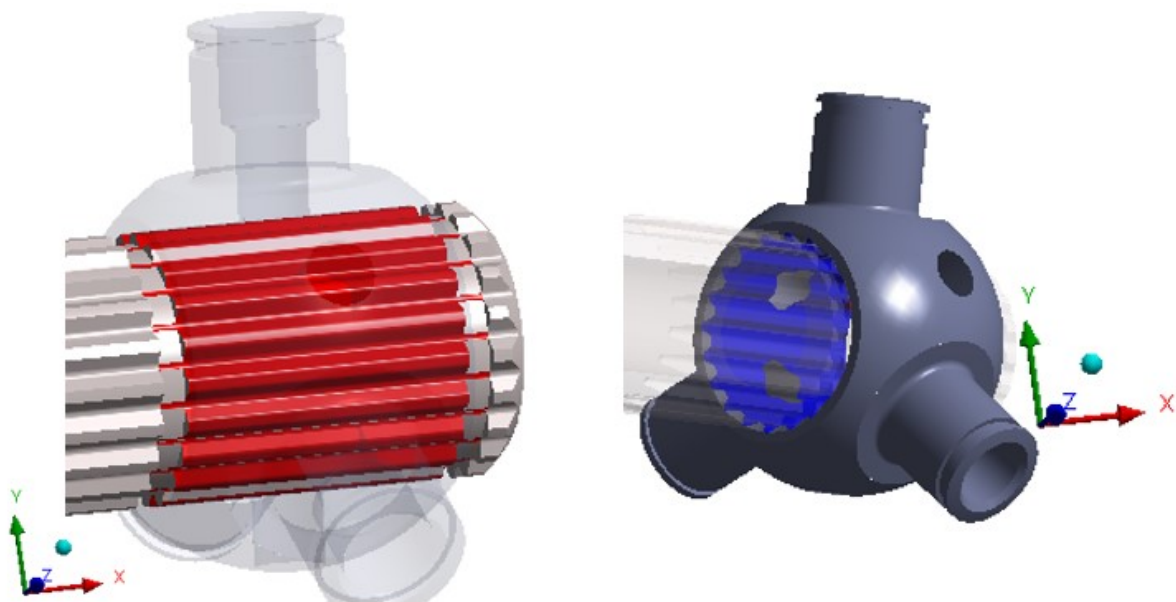
Konečno prvkový model byl vytvořen na základě modelu geometrického. Tento model byl vytvářen v modulu Mechanical. Konečno prvková síť byla vytvářena s ohledem na předpokládané výsledky. V tomto případě byla síť zjemněna v oblasti kontaktů hřídele s tripodý. Tripody byly síťovány elementy o velikosti 3 mm. V oblasti, kde dojde ke kontaktu s hřídelem, byla síť zjemněna na velikost 1,2 mm. Velikost těchto elementů byla nastavena také do hloubky materiálu, a to konkrétně do vzdálenosti 1,5 mm od této plochy. Pro hřídel byla zvolena velikost elementu 1,5 mm a stejně jako v případě tripodu byla zjemněna v oblasti kontaktu. Vzhledem k volbě Conta a Targe strany v definici kontaktu byla na hřídeli vytvořena síť jemnější než na tripodu. Velikost elementu byla nastavena na 0,8 mm a opět byla síť zjemněna do hloubky ve vzdálenosti 1,2 mm. Hladká část hřídele byla síťována pomocí hexaelementů. Celkem bylo použito 535 675 uzlů a 332 153 elementů.



Obrázek 31: Konečnoprvkový model hřídele s tripodý

4.4.4. Nastavení kontaktů

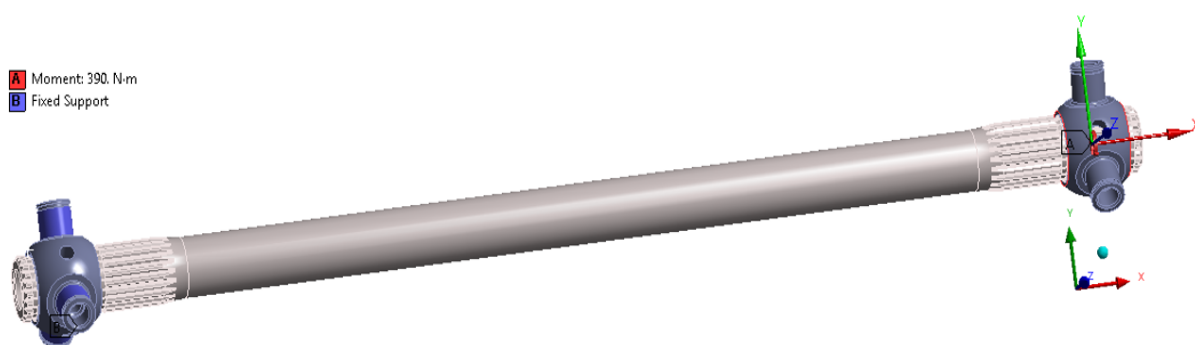
Kontaktní rozhraní a algoritmy byly nastaveny pro oba tripody totožně. Byly zvoleny třecí kontakty a hodnota koeficientu tření byla rovna 0,2. V těchto kontaktech byl nastaven Penaltní algoritmus na Gaussových bodech. Relativní hodnota normálové tuhosti byla zvolena na hodnotu 0,01 a bylo zakázáno obnovení kontaktní tuhosti během výpočtu.



Obrázek 32: Pár kontaktních ploch

4.4.5. Okrajové podmínky

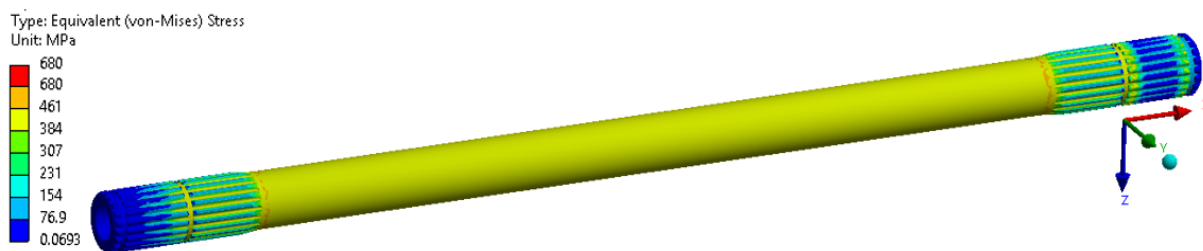
Okrajové podmínky byly voleny stejně jako v předešlých případech tak, aby co nejpřesněji simulovaly zatížení hřídele. Pro jeden tripod byla použita okrajová podmínka fixed support, která zamezuje posuvům ve všech osách a rotacím okolo všech os. Druhou okrajovou podmínkou byl zatěžující moment o velikosti 390 Nm. Hodnota tohoto momentu byla aplikována v lokálním souřadném systému, který je společně s okrajovými podmínkami zobrazen na následujícím obrázku. Tento lokální souřadný systém byl zvolen ve středu zatěžujícího tripodu.



Obrázek 33: Aplikované okrajové podmínky

4.4.6. Výsledky

Cílem této analýzy bylo vyhodnotit redukované napětí podle hypotézy HMM, první hlavní napětí a maximální smykové napětí. Stejně jako v podkapitole 1.3.5 byly výsledky vyhodnocovány v konečném čase, kde byla hodnota kroutícího momentu rovna 390 Nm. Bylo zjištěno, že nedojde k překročení meze kluzu, a tudíž nedojde k plastické deformaci. Opět bylo prokázáno, že napětí zjištěné při simulaci odpovídá stavu reálné součásti používané na vozidle. Důraz byl kladen především na kontrolu hladké části hřídele. V hladké části hřídele byla hodnota ekvivalentního napětí rovna 460 MPa.



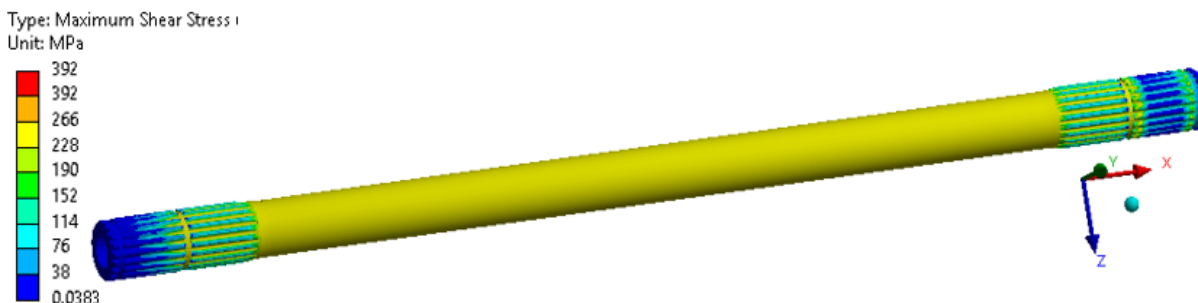
Obrázek 34: Vyhodnocení ekvivalentního napětí na hřídeli

Hodnota prvního hlavního napětí v hladké části nebyla vyšší než mez kluzu. První hlavní napětí bylo rovno 260 MPa.



Obrázek 35: Výsledky prvního hlavního napětí

Při zkoumání maximálního smykového napětí bylo zjištěno, že opět nebude překročena mez kluzu. Výslednou hodnotou v hladké části je 266 MPa.



Obrázek 36: Vyhodnocení maximálního smykového napětí

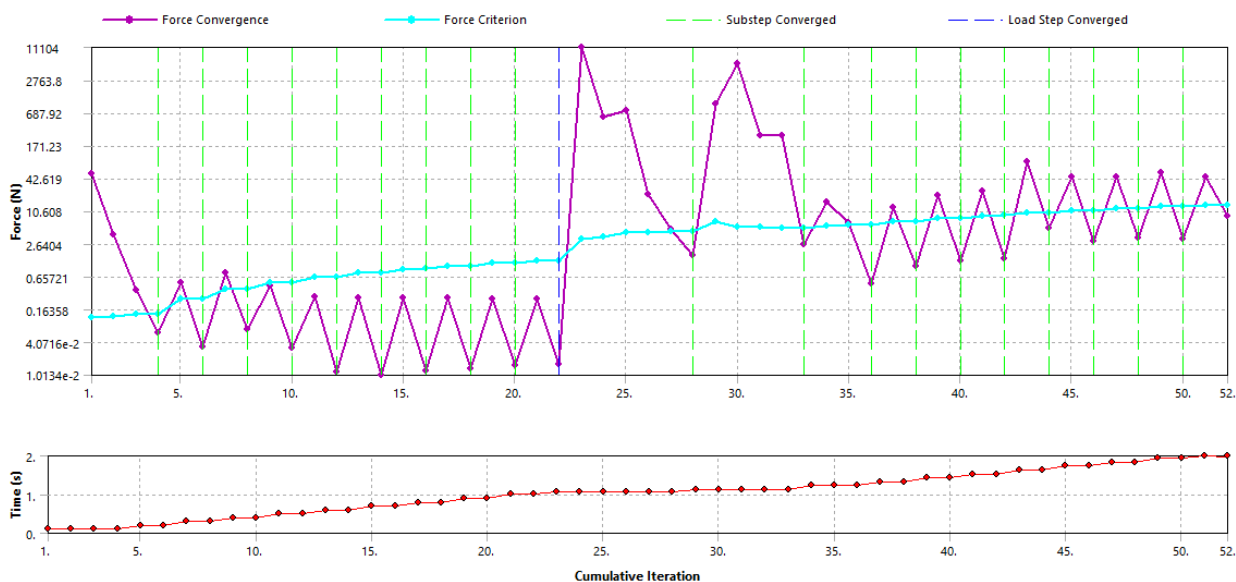
4.5. Nastavení analýz

Simulace zatížení hnacího hřídele automobilu byla v této diplomové práci simulována jako statická pevnostní analýza. Cílem byla pevnostní kontrola současného hřídele.

Výpočetní čas byl stanoven na 2 sekundy. Důvody tohoto nastavení byly takové, že se jedná o nelineární úlohu obsahující elasticko-plastický materiálový model, nelineární kontakty, velké natočení a posuvy. Celá analýza byla rozdělena na dva kroky, které zajišťovaly požadované zatížení hřídele kroutícím momentem. V prvním kroku došlo k inicializaci nelineárních kontaktů a v kroku druhém byl aplikován zatěžující moment. Nastavení jednotlivých pod kroků můžete vidět v tabulce 15.

Tabulka 15: Počet kroků výpočtu

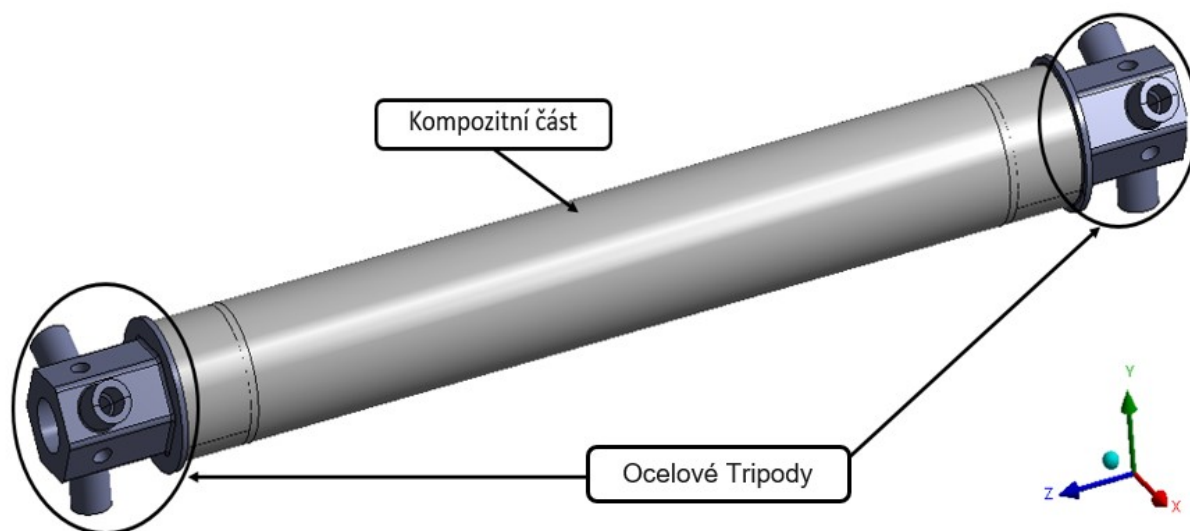
	1.krok	2.krok
Počáteční iterační krok výpočtu	10	15
Minimální iterační krok výpočtu	10	10
Maximální iterační krok výpočtu	10	1000



Obrázek 37: Průběh silové konvergence pro řešení hřídele s tripody

5. Návrh nového hnacího hřídele

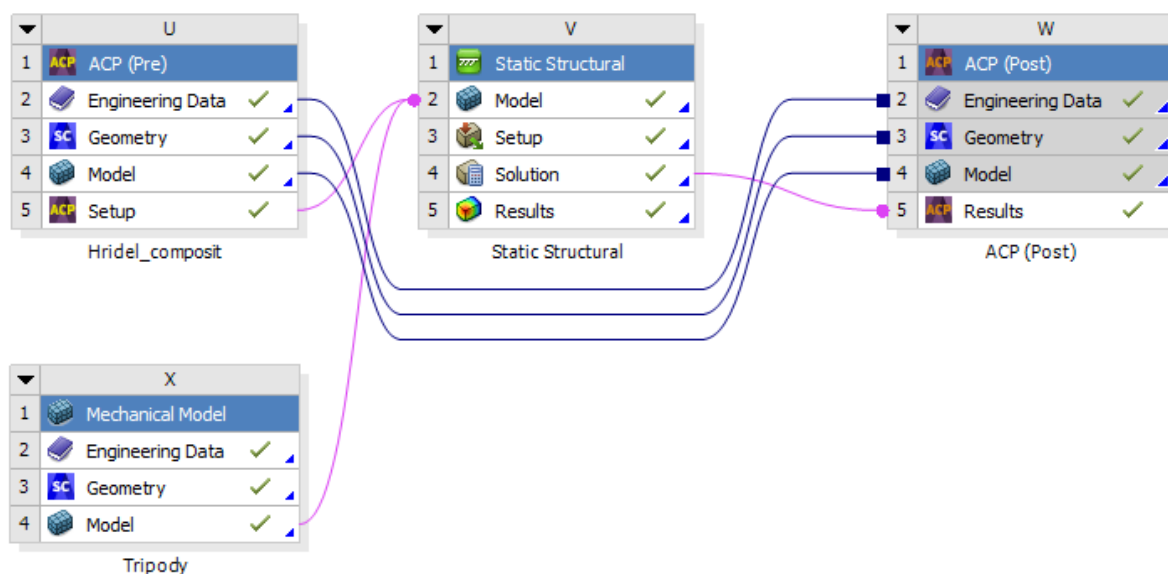
Nový hnací hřídel pro studentskou formuli Vector06 byl navrhován jako kombinace kompozitu a oceli. Kompozitní částí byla hladká kruhovitá část hřídele. Tripody, které zajišťují přenos kroutícího momentu, byly navrhovány z oceli.



Obrázek 38: Nová geometrie hnacího hřídele

5.1. Kontrola nově navrženého hřídele

Kontrola hřídele byla provedena v konečnoprvkovém softwaru Ansys Workbench. Byly použity nástavby ACP preprocessor a také ACP postprocessor, které byly využity při tvorbě kompozitních vrstev.



Obrázek 39: Schéma projektu v programu Ansys Workbench

5.1.1. Materiálové modely

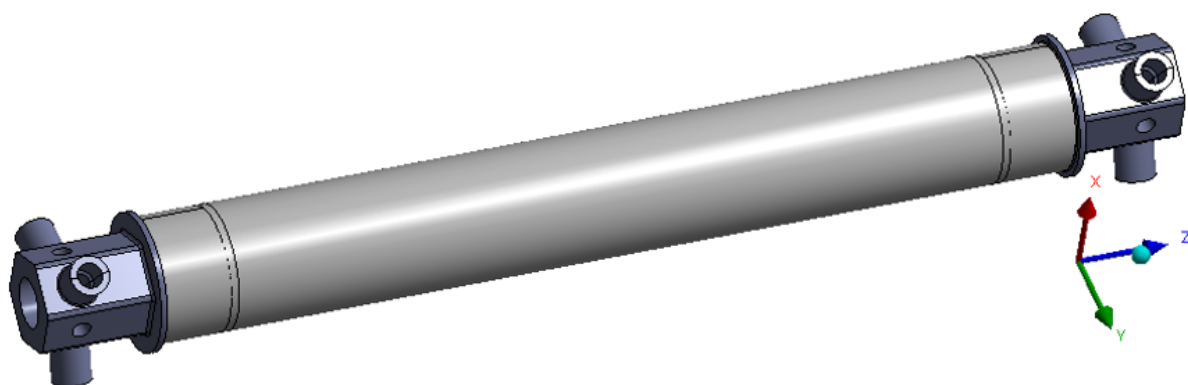
Při návrhu nového hřídele byly použity kompozitní materiály z knihovny Ansys. Konkrétně byly použity tkaniny z jednosměrného vlákna tzv. unidirectional a druhá tkanina byla spletená v úhlu 90° označovaná jako woven. Obě tkaniny již byly definovány jako předimpregnované. Vlastnosti těchto materiálů jsou uvedeny v tabulce 16. Tyto materiálové vlastnosti byly převzaty z materiálové knihovny programu Ansys Workbench.

Tabulka 16: Mechanické vlastnosti použitých materiálů

Vlastnosti / Materiál	UD	Tkanina 90° (Woven)
E_X	121000 MPa	61340 MPa
E_Y	8600 MPa	61340 MPa
E_Z	8600 MPa	6900 MPa
μ_{XY}	0,27	0,04
μ_{YZ}	0,4	0,3
μ_{XZ}	0,27	0,3
G_{XY}	4700 MPa	3300 MPa
G_{YZ}	3100 MPa	2700 MPa
G_{XZ}	4700 MPa	2700 MPa

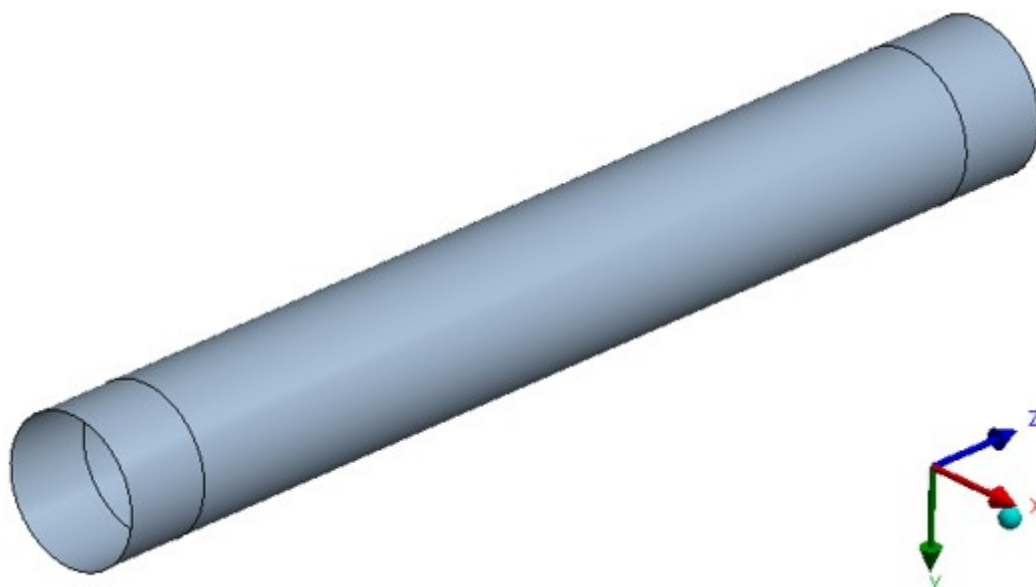
5.1.2. Geometrický model

Geometrický model s potřebnými rozměry byl převzat od studentů, kteří se podíleli na tvorbě nové studentské formule s označením Vector06. Analyzovaný geometrický model byl rozdělen na dvě části. Jednou částí byly tripody, které byly v simulaci zahrnuty jako 3D solidy. Druhou částí byla kompozitní trubka, která byla zahrnuta jako skořepina. Geometrický model tripodů byl upraven a zjednodušen v geometrickém modeláři SpaceClaim. Trubka byla modelována také v programu SpaceClaim. Byla však spojena s modulem ACP, který je určen pro tvorbu kompozitů.



Obrázek 40: Kompletní geometrický model hnacího hřídele

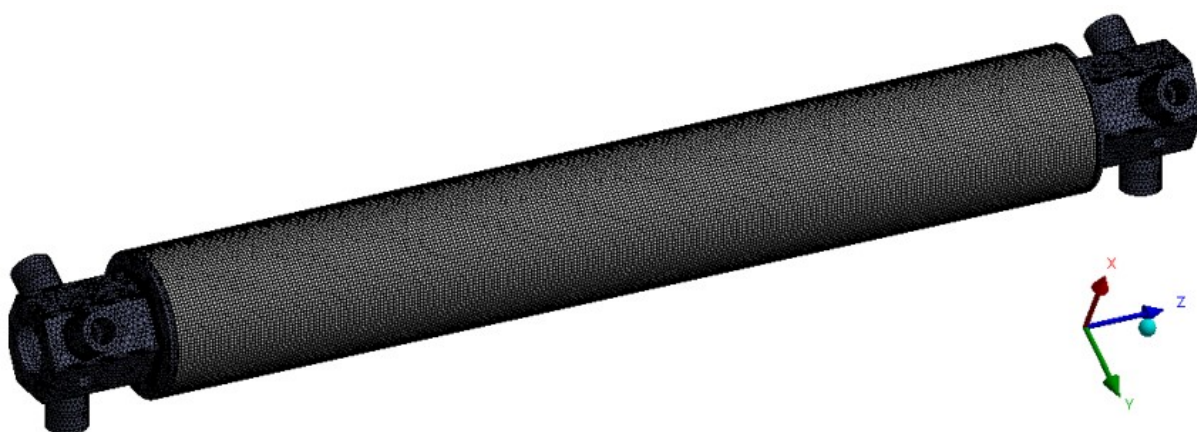
Skořepina byla modelována jako dolní plocha objímky. V takovémto případě dochází k vrstvení jednotlivých vrstev směrem ven. Tímto bude zajištěno, že nedojde ke změně vnitřního průměru, který je v kontaktu s tripody.



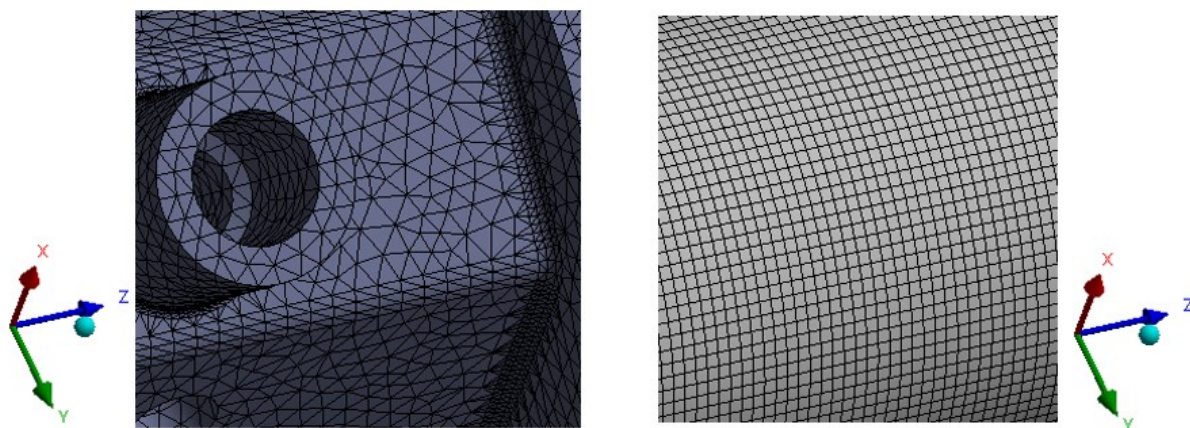
Obrázek 41: Skořepinový model kompozitní části trubky

5.1.3. Konečnoprvkový model

Konečnoprvkový model byl vytvořen na základě modelu geometrického. Model byl vytvořen v nástavbě Mechanical, který je pro tento účel určený. Konečnoprvkovou síť však bylo nutné připravit pro tyč i tripody zvlášť. Kvalitu sítě bylo nutné vytvářet s ohledem na předpokládané výsledky simulace. Velikost elementů na trubce byla v tomto případě zvolena 1mm. Vzhledem k následující volbě ploch Conta a Target byla na hřídeli vytvořena jemnější síť než na tripodech. Tato síť je vstupem do modulu ACP preprocessor, který umožňuje zahrnout natočení souřadných systémů prvků, které korespondují se směrově závislými vlastnostmi kompozitního materiálu. Tripody byly síťovány elementy o velikosti 1,5mm. Konečnoprvková síť je zobrazena na obrázcích 42 a 43.



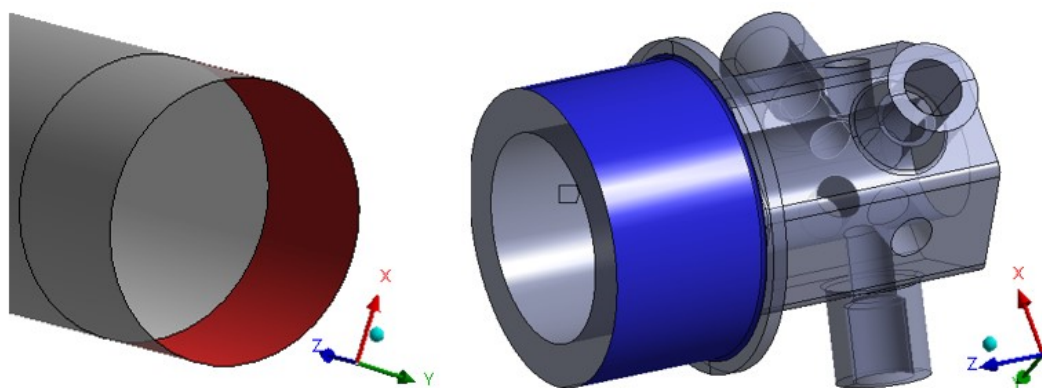
Obrázek 42: Konečnoprvkový model nově navrženého hřídele



Obrázek 43: Detail konečnoprvkové sítě (vlevo tripod, vpravo trubka)

5.1.4. Nastavení kontaktů

Jako další bylo potřeba nastavit kontakty mezi tripodem a kompozitní trubicí. Spojení jednotlivých částí bude ve skutečnosti realizováno pomocí lepidla a bude se tedy jednat o lepený spoj. V případě této analýzy byl kontakt zjednodušen na prostý lepený (Bonded) kontakt, který zamezuje jakémukoliv posuvu a protočení tripodů v trubce. Byl nastaven Penaltní algoritmus, jehož detekce byla nastavena na Gaussovy body. Hodnota relativní normálové tuhosti byla zvolena 1. Obnovení normálové tuhosti během výpočtu bylo v definici kontaktu zakázáno.



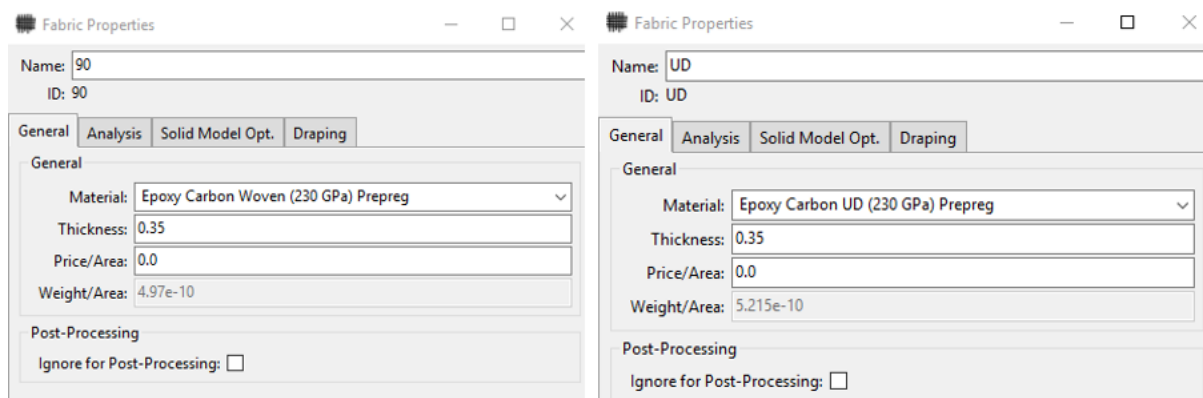
Obrázek 44: Volba Conta a Targe strany v kontaktu

5.1.5. ACP Preprocessor

Nastavení ortotropních vlastností, směr vinutí vláken a vrstvení jednotlivých vrstev kompozitu bylo nastaveno v modulu ACP Preprocessor.

Tkaniny

V případě trubky analyzované v této diplomové práci byly vybrány materiály, které byly použity v této analýze. Jednalo se o předdefinované materiály v knihovně Ansys Workbench. Konkrétně se jednalo o před impregnované karbonové tkaniny. První byla tkanina obsahující uhlíková vlákna uložená pouze v jednom směru. Druhou byla tkanina tvořená vlákny, která jsou navzájem propletena. Tato vlákna svírají mezi sebou úhel 90° . Tloušťka jednotlivých vrstev byla odhadnuta na 0,35mm.



Obrázek 45: Tkaniny použité při analýze trubky

Vrstvení

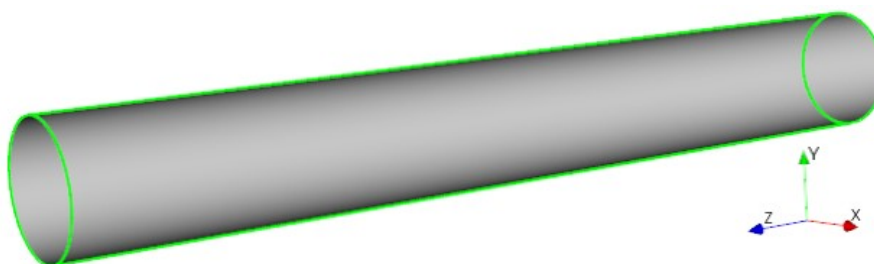
V tomto oddíle je možné nastavit vrstvení a orientaci jednotlivých tkanin vzhledem k obvodovému směru. Konkrétně bylo vrstveno 6 různých vrstev, ze kterých byla kompozitní trubka tvořena. Jako první byla kladena 90° tkanina, která byla natočena o 45° k ose trubky. Druhou vrstvou byla jednosměrná tkanina (UD). Tato tkanina byla uložena tak, že směr uhlíkových vláken byl totožný s osou trubky. Následovaly dvě vrstvy 90° tkaniny, které byly uloženy kolmo na osu trubky. Jako pátá vrstva byla použita opět jednosměrná se směrem vláken v ose trubky. Vnější vrstva byla tvořena opět 90° tkaninou, která byla opět natočena o 45° k ose. Z každého typu tkaniny byly použity tedy 2 vrstvy. Jednotlivé vrstvy tkaniny, které byly použity, jsou zobrazeny na obrázku 46.



Obrázek 46: Jednotlivé vrstvy kompozitní trubky

Sada prvků

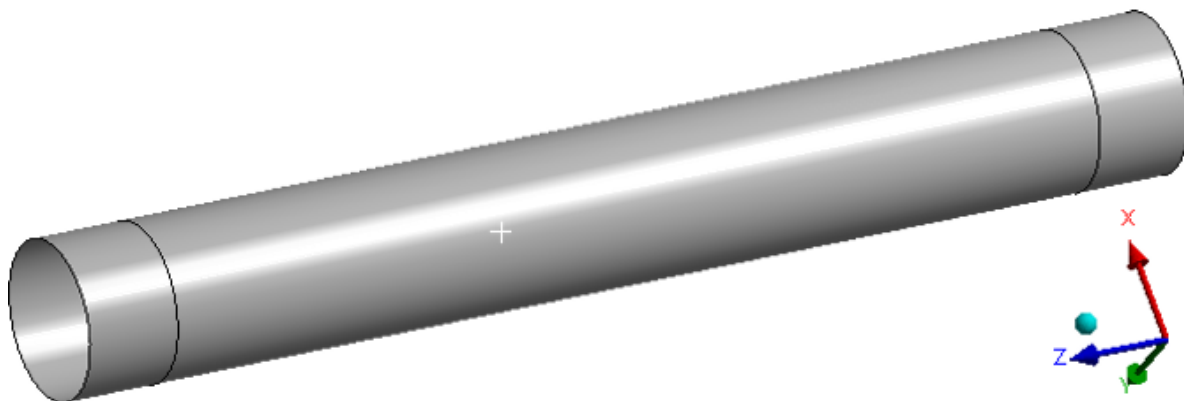
Bylo potřeba zvolit prvky, na které se bude vztahovat celé nastavení jednotlivých vrstev. Konkrétně byla vytvořena pouze jedna sada, která obsahovala všechny skořepinové prvky trubky.



Obrázek 47: Sada prvků

Geometrie

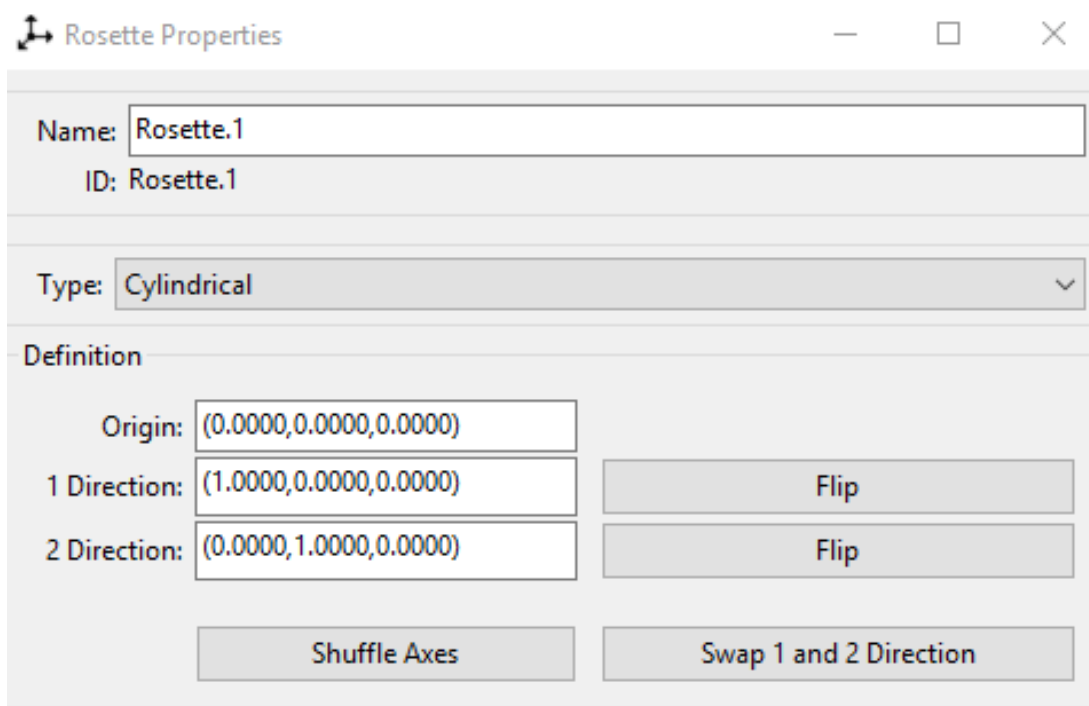
Geometrie trubky byla importována z programu SpaceClaim. Tato plocha tvořila vnitřní průměr trubky. Od této plochy byly následně tkaniny vrstveny směrem ven.



Obrázek 48: Použitá geometrie

Růžice

Vzhledem k rotačnímu charakteru geometrie reprezentující trubku bylo potřeba vytvořit souřadný systém, který zajišťuje správné nastavení směru vláken (tkanin). Souřadný systém byl vytvořen v cylindrickém souřadném systému, který měl střed v souřadnicích (0;0;0). Následně bylo potřeba nastavit směr os, které byly nastaveny podle obrázku 49.

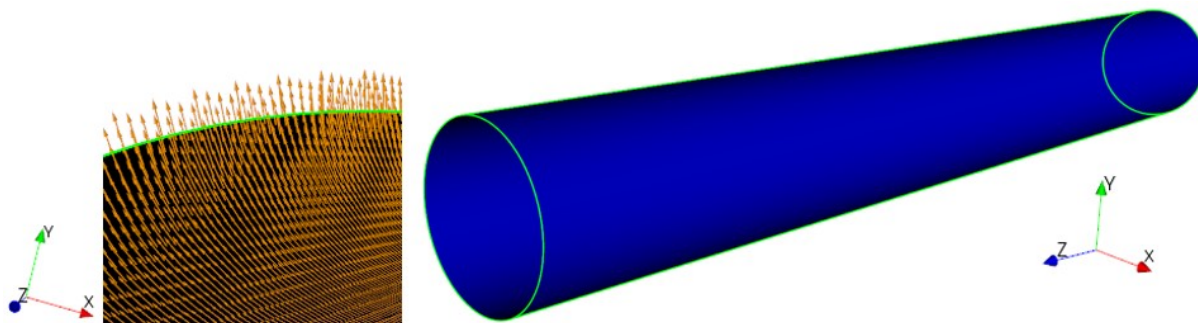


Obrázek 49: Definice růžice pro směr vláken

Orientované výběrové sady

Ve chvíli, kdy byla zvolena sada prvků a byla nadefinována různice zajišťující správné nastavení směru vláken, bylo potřeba nastavit souřadný systém do požadovaného směru vláken.

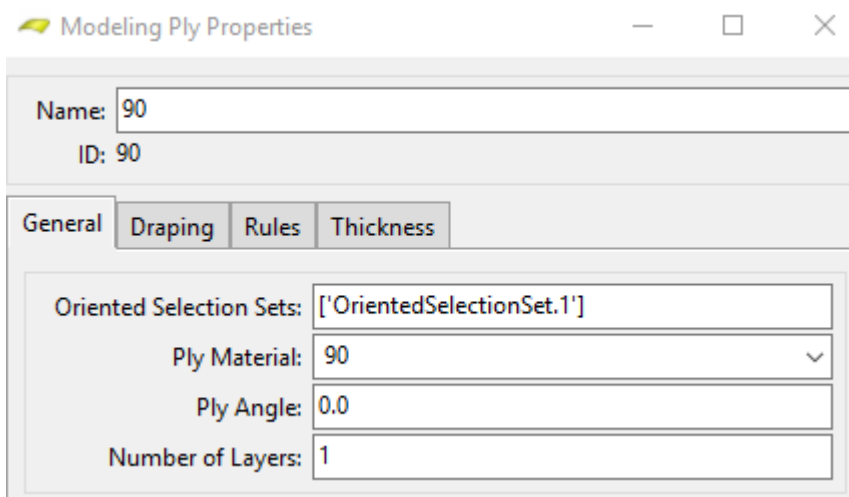
Normálový směr těchto vláken musí směřovat ven, aby bylo zajištěno dodržení požadavků pro vrstvení. V případě, že by tento směr nebyl zvolen správně, tloušťka skořepiny by se tvořila směrem dovnitř, a tudíž by se zmenšoval průměr kompozitní trubky.



Obrázek 50: Definice skořepinových prvků a určený směr vrstvení, který je znázorněn oranžovou šipkou

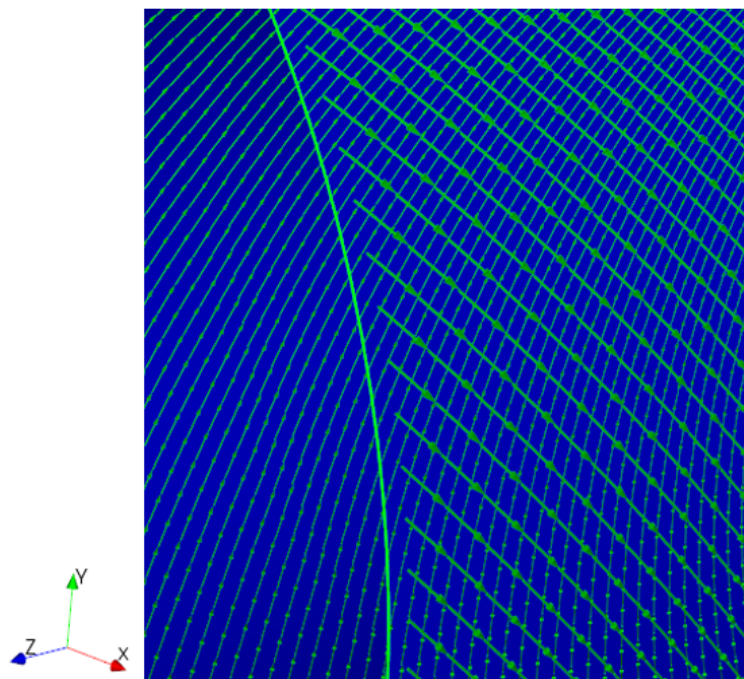
Modelová skupina

Pro zkoumaný hřídel byla vytvořena pouze jedna modelová skupina, ve které budou nadefinovány jednotlivé vrstvy materiálu. Každá vrstva v této modelové skupině byla charakteristická použitým materiálem a natočením vláken k ose trubky. Tuto definici můžete vidět na obrázku 51, kde je znázorněna definice pro třetí vrstvu trubky, kterou byla 90° tkanina.



Obrázek 51: Definice třetí vrstvy kompozitní trubky

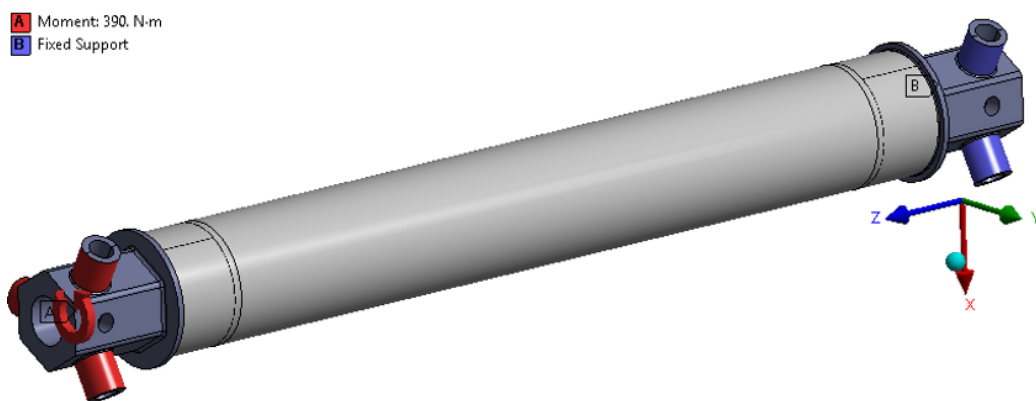
V modelové skupině je také možné zkontrolovat si směr vláken pro každou vrstvu. Směr jednotlivých vláken je zobrazen zelenými šipkami. Jako příklad je uvedena tkanina, která je k ose trubky natočena o 45°.



Obrázek 52: Orientace vláken tkaniny v úhlu 45° k ose trubky

5.1.6. Okrajové podmínky

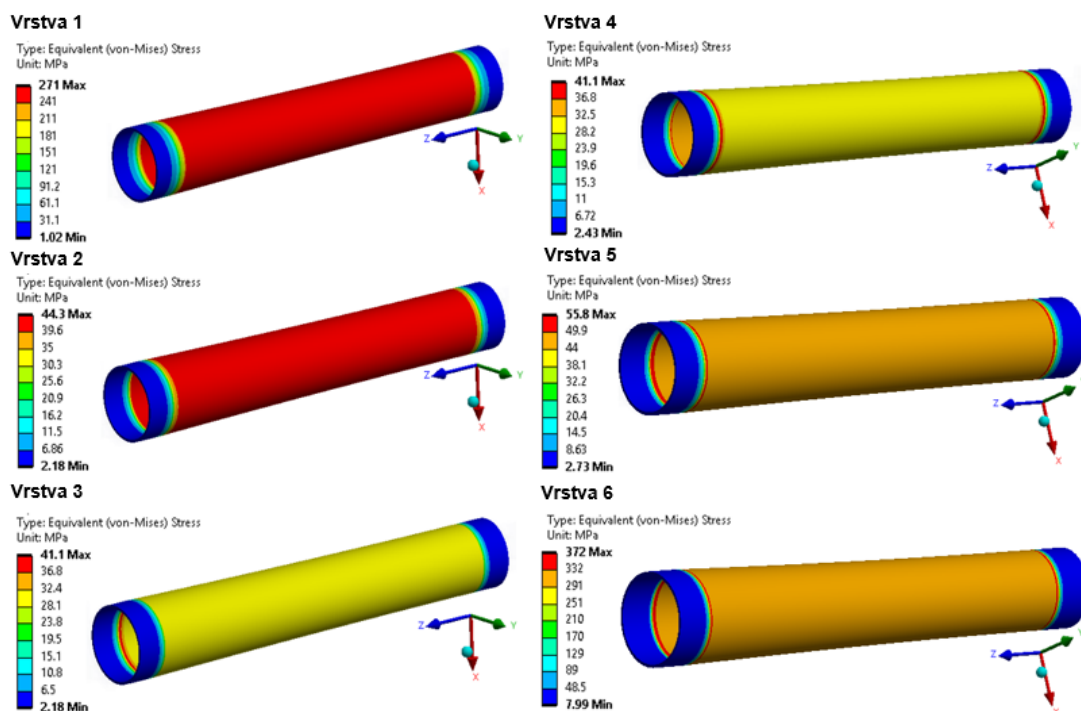
Okrajové podmínky byly stejně jako v předešlých kapitolách nastaveny tak, aby co nejpřesněji popsaly chování a zatížení hřídele při akceleraci formule. Na jeden tripod byla zvolena okrajová podmínka fixed support simulující kolo formule. Tato okrajová podmínka zamezuje posuvu a natočení v jakémkoliv směru. Na druhý tripod byla aplikována podmínka simulující zátěžný moment vystupující z motoru na hřídel. Hodnota kroutícího momentu byla v tomto případě stejná jako v předchozích kapitolách. Jednalo se o 390Nm. Okrajové podmínky jsou znázorněny na obrázku 53.



Obrázek 53: Okrajové podmínky aplikované na kompozitním hřídeli

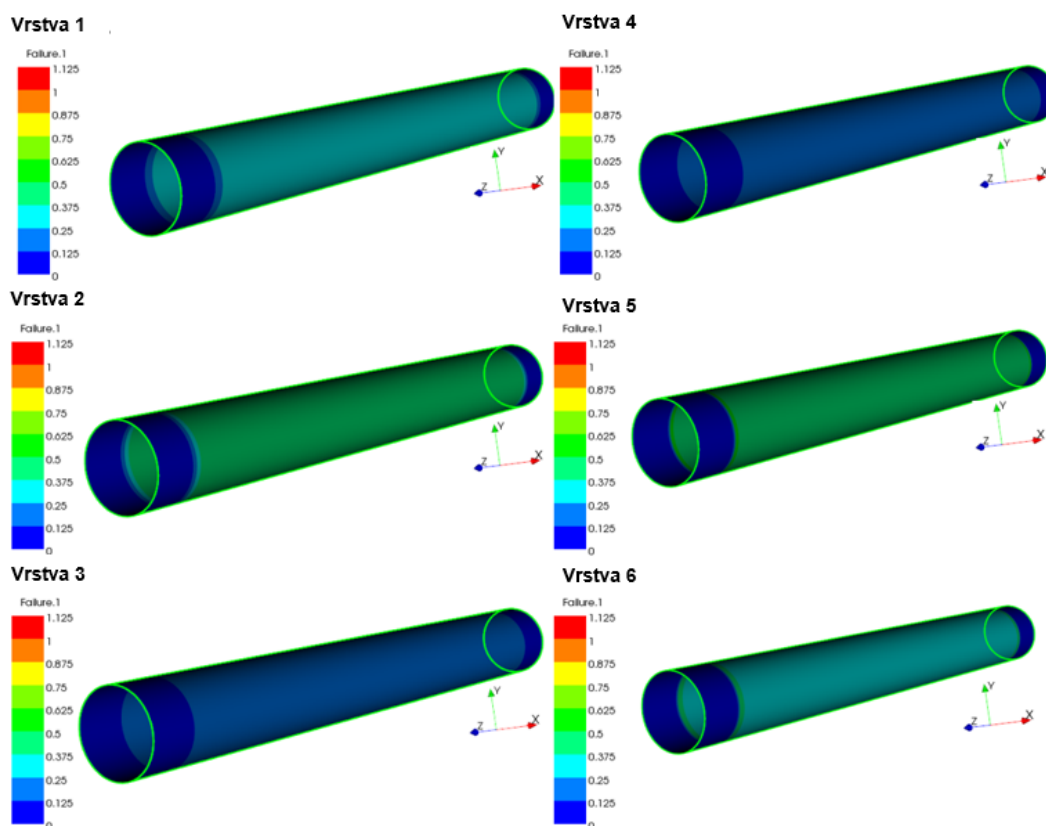
5.1.7. Vyhodnocení výsledků

Vhodnost kompozitního řešení byla v tomto případě vyhodnocována na základě dvou kritérií. Prvním kritériem bylo vyhodnocení na základě maximálního napětí (Ekvivalentní napětí HMMH), které bylo kontrolováno v prostředí Mechanical. Toto vyhodnocení je zobrazeno na obrázku 54.



Obrázek 54: Vyhodnocení napětí pro jednotlivé vrstvy kompozitního hřídele

Jako druhá byla využita kontrola kritérií porušení. Bylo použito kritérium maximálního napětí. Všechny kontroly byly provedeny pro každou vrstvu hřídele.



Obrázek 55: Kontrola kritérií porušení

Pro všechny vrstvy je použita stejná barevná škála. V případě, že by došlo k porušení kompozitního hřídele, musela by být hodnota tohoto kritéria vyšší než 1. Pokud by se tak stalo, tyto oblasti by byly zvýrazněny červenou barvou. Námi navržená hřídel je tedy vyhovující.

6. Závěr

Jako první byl v této práci určován maximální krouticí moment, kterým je současný hřídel zatěžován. Tento moment byl určen na základě koeficientu tření, který je mezi závodní pneumatikou a suchým asfaltem. Následně byla pomocí rovnic rovnováhy stanovena normálová síla působící na zadní nápravu vozidla. Z této síly byl pomocí koeficientu tření vypočítán hnací moment pro jedno kolo, který je roven hodnotě 389,89 Nm.

Následně byla provedena kontrola původního hřídele, u kterého byla provedena pevnostní kontrola a také kontrola na otláčení. Hladká a nejužší část hřídele byla kontrolována z hlediska pevnostního a drážkování bylo kontrolováno na otláčení. Při kontrole hladké části byla hodnota ekvivalentního napětí rovna 460 MPa. Hodnota smykového napětí byla rovna 265 MPa. Všechny tyto hodnoty jsou rovny mezi kluzu a nedojde tedy k plastické deformaci hřídele.

Dalším parametrem, který byl kontrolován u původního hřídele bylo drážkování. Zde byla vyhodnocována hodnota tlaku, která způsobuje otláčení hřídele. Tato kontrola byla provedena pouze na částech, kde se vyskytuje drážkování. Celá geometrie byla v rámci této simulace zjednodušena na 2D geometrii a bylo tak možné vytvořit síť s požadovanou kvalitou. Hodnota tlaku byla stanovena jako střední hodnota všech hodnot tlaku v jednotlivých uzlech. Výsledná hodnota byla tedy 241,9 MPa.

Jako poslední byla provedena kontrola stávajícího hřídele, kdy bylo zatížení aplikováno na tripody. Tyto tripody přenášejí krouticí moment z hřídele na kolo. Napětí bylo vyhodnocováno opět jen na hladké části hřídele. Ekvivalentní napětí bylo rovno hodnotě 460 MPa. Byla zjišťována také hodnota maximálního smykového napětí, která byla rovna 265 MPa. Tato kontrola byla provedena zejména jako ověření výpočtu zjednodušeného hřídele.

Poslední částí této práce byl návrh nového hřídele. Hřídel byl navržen podle požadavků studentů účastnících se na projektu Formula Student. Jak již bylo zmíněno, hlavním požadavkem bylo provedení konstrukce tak, aby nemuselo dojít k návrhu nových nábojů a pořízení nových ráfků formule. Z tohoto důvodu byl navržen průměr trubky 40 mm s tloušťkou stěny 2,1 mm. Jako nejlepší řešení bylo zvoleno řešení z kompozitních materiálů s tripody, které byly vlepeny do trubky. Samotná trubka byla tvořena šesti vrstvami. Vrstvy byly tvořeny dvěma druhy tkanin, z nichž dvě tvořila tkanina jednosměrná (UD), dvě byly tvořeny tkaninou v úhlu 90° na osu hřídele a dvě vrstvy byly tvořeny tkaninou s úhlem 45° k ose hřídele. Podrobný popis jednotlivých vrstev je popsán v kapitole 5.1.5. Tento návrh byl následně simulován a kontrolován pomocí nadstavby programu Workbench ACP Postprocessor. Ekvivalentní napětí vyhodnocené na jednotlivých vrstvách byly nižší než kritická hodnota pro tyto tkaniny. Toto tvrzení je ověřeno také kontrolou kritéria porušení. Toto kritérium ukázalo, že nedojde k porušení u vláken ani v matrici.

Seznam obrázků

Obrázek 1: Křížový kloub [19]	15
Obrázek 2: Příklad homokinetického kloubu [18]	15
Obrázek 3: Jednotlivé typy vláknových kompozitů	18
Obrázek 4: Skelná vlákna určená jako výztuha do betonu [7]	20
Obrázek 5: Tkanina z uhlíkových vláken [6]	21
Obrázek 6: Aramidová vlákna [8]	22
Obrázek 7: Tekutá epoxidová pryskyřice	24
Obrázek 8: Polyetylen ve formě granulí [13]	26
Obrázek 9: Příklad polystyrenu	27
Obrázek 10: Polyamidová ozubená kola [12]	28
Obrázek 11: Aplikace polykarbonátu při výrobě ochranného štítu [14]	28
Obrázek 12: Ruční kladení předimpregnovaných tkanin	30
Obrázek 13: Schéma výroby tahovým procesem [9]	31
Obrázek 14: Schéma navíjení vláken mokrou metodou [9]	31
Obrázek 15: Schéma výroby SMC kompozitu [15]	32
Obrázek 16: Schéma sil působících na formuli	34
Obrázek 17: Bilineární Isotropní model	37
Obrázek 18: Geometrický model hladké hřídele	38
Obrázek 19: Konečnoprvkový model hřídele	38
Obrázek 20: Detail konečno prvkové sítě na hřídeli	38
Obrázek 21: Aplikované okrajové podmínky	39
Obrázek 22: Redukované napětí na hřídeli	39
Obrázek 23: První hlavní napětí na hřídeli	40
Obrázek 24: Smykové napětí na hřídeli	40
Obrázek 25: Zjednodušený geometrický model	41
Obrázek 26: Konečno prvkový model s detailem sítě	42
Obrázek 27: Kontakt mezi hřídelí a tripodem	43
Obrázek 28: Aplikace okrajových podmínek na zjednodušeném modelu	43
Obrázek 29: Průběh kontaktního tlaku na drážce	44
Obrázek 30: Geometrický model hřídele s tripody	45
Obrázek 31: Konečnoprvkový model hřídele s tripody	45
Obrázek 32: Pár kontaktních ploch	46
Obrázek 33: Aplikované okrajové podmínky	46
Obrázek 34: Vyhodnocení ekvivalentního napětí na hřídeli	47
Obrázek 35: Výsledky prvního hlavního napětí	47
Obrázek 36: Vyhodnocení maximálního smykového napětí	47
Obrázek 37: Průběh silové konvergence pro řešení hřídele s tripody	48
Obrázek 38: Nová geometrie hnacího hřídele	49
Obrázek 39: Schéma projektu v programu Ansys Workbench	49
Obrázek 40: Kompletní geometrický model hnacího hřídele	50
Obrázek 41: Skořepinový model kompozitní části trubky	51
Obrázek 42: Konečnoprvkový model nově navrženého hřídele	51

Obrázek 43: Detail konečnoprvkové sítě (vlevo tripod, vpravo trubka)	52
Obrázek 44: Volba Conta a Targe strany v kontaktu	52
Obrázek 45: Tkaniny použité při analýze trubky	53
Obrázek 46: Jednotlivé vrstvy kompozitní trubky	53
Obrázek 47: Sada prvků	53
Obrázek 48: Použitá geometrie	54
Obrázek 49: Definice růžice pro směr vláken	54
Obrázek 50: Definice skořepinových prvků a určený směr vrstvení, který je znázorněn oranžovou šipkou	55
Obrázek 51: Definice třetí vrstvy kompozitní trubky	55
Obrázek 52: Orientace vláken tkaniny v úhlu 45° k ose trubky	56
Obrázek 53: Okrajové podmínky aplikované na kompozitním hřídeli	56
Obrázek 54: Vyhodnocení napětí pro jednotlivé vrstvy kompozitního hřídele	57
Obrázek 55: Kontrola kritérií porušení	57

Literatura

- [1] *Mechanika Kompozitních materiálů*. Brno, 2008. Výuková opora. Vysoké Učení Technické v Brně.
- [2] BÁBÍK, Adam. *Polymerní kompozity s vyššími uživatelskými vlastnostmi: (Zkrácená verze Ph.D. Thesis)* [online]., 37 [cit. 2020-04-08].
- [3] KAREL DAĐOUREK. *Kompozitní materiály: Druhy a jejich užití*. Liberec: Technická Univerzita v Liberci, 2007
- [4] Použité materiály. *Duratec* [online]. Město Touškov: Duratec [cit. 2020-04-11]. Dostupné z: <https://www.duratec.cz/cs/techinfo/pouzivane-materialy/uhlikova-vlakna-karbonove-kompozity/>
- [5] Composites 101. *CompositesWorld* [online]. Composites World. Dostupné z: <https://www.compositesworld.com/articles/composites-101-fibers-and-resins>
- [6] Banggood. *Banggood* [online]. Composites World. Dostupné z: https://www.banggood.com/cs/Carbon-Fiber-Fabric-Cloth-3K-Twill-Weave-127x91cm-p-1119754.html?cur_warehouse=UK
- [7] Stavebniny Janík. *Stavebniny Janík* [online]. Stavebniny Janík. Dostupné z: <https://www.stavebniny-janik.cz/vlakna-do-betonu-sklenena-anti-crak-hd-600-g>
- [8] Veba. *Veba* [online]. Veba materials. Dostupné z: <http://www.veba.cz/cs/materialy>
- [9] Polymer Matrix Materials. *Springerprofesional* [online]. Springerprofesional. Dostupné z: <https://www.springerprofessional.de/en/polymer-based-composite-structures-processing-and-applications/10875898?fulltextview=true>
- [10] Epoxidové Pryskyřice. *5M* [online]. 5M. Dostupné z: <https://www.5m.cz/produkty/epoxidove-pryskyrice/tekute-epoxidove-pryskyrice>
- [11] ARD Fonte Polyuretanové pryskyřice. *ARD Fonte* [online]. ARD Fonte. Dostupné z: <http://ardfonte.cz/polyuretanove-pryskyrice.html>
- [12] MM Spektrum Plastová ozubená kola. *MM Spektrum* [online]. MM Spektrum. Dostupné z: <http://firmy.mmspektrum.com/clanek/perspektivy-plastovych-ozubenych-prevodu.html>
- [13] 123RF. *123RF* [online]. [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: https://www.123rf.com/photo_105324008_hdpe-transparent-polyethylene-granules-plastic-pellets-plastic-raw-material-high-density-polyethylen.html
- [14] Compass. *Compass* [online]. [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <http://obchod.compass.cz/zbozi/stit-ochranny-polykarbonatovy.html>
- [15] Prefa Composit. *Prefa Composit* [online]. [cit. 2020-04-15]. Dostupné z: <https://www.prefa-kompozity.cz/technologie-vyroby/>
- [16] Formula Student. *Formula Student* [online]. Ostrava: VŠB Ostrava, 2015 [cit. 2020-04-22]. Dostupné z: <http://formula.vsb.cz/cs/formula-student/>
- [17] VLK, František. *Převody motorových vozidel*. 1. vyd. Brno: 2006, 371 s. ISBN 80-239-6463-1.
- [18] Autoblink. *Autoblink* [online]. Autoblink, 2019 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://autoblink.cz/homokineticky-kloub-jak-funguje-a-jak-se-projevuje-jeho-poskozeni/>
- [19] Zemědělské potřeby. *Eshop Zemědělské potřeby* [online]. Zemědělské potřeby M+S, 2020 [cit. 2020-04-24]. Dostupné z: <https://www.eshop-zemedelske-potreby.cz/krizovy-kloub-vhodny-pro-obracece-deutz-fahr-kh-2-4-6-p30671/>